



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**PŘÍPRAVA ŘEZŮ VZORKŮ A JEJICH ANALÝZA
METODOU SIMS**

PREPARATION OF SAMPLE CROSS-SECTIONS AND ANALYSIS BY SIMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JURAJ KARLOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR BÁBOR, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Bc. Juraj Karlovský**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce: **Ing. Petr Bábor, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Příprava řezů vzorků a jejich analýza metodou SIMS

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hmotnostní spektroskopie sekundárních iontů (SIMS) je analytická metoda hojně používaná v elektrotechnickém průmyslu kvůli její vysoké citlivosti. Umožňuje měření hloubkových profilů dopantů v polovodičích nebo i 3D profilování různých struktur. Výzkumná infrastruktura CEITEC disponuje zařízením TOF–SIMS5 od firmy IONTOF, které tyto analýzy umožňuje. Při analýze pórovitých vzorků či vzorků obsahujících struktury s různou rychlostí odprašování, je vhodné provádět řezy vzorků a následně na takto připravených řezech provést analýzu. Řezy lze provést pomocí fokusovaného iontového svazku nebo mechanickým broušením. Diplomová práce se bude zabývat optimalizací postupů při tvorbě a analýze těchto řezů a navrhne úpravu stávajícího držáku vzorků umožňující rotaci vzorku.

Cíle diplomové práce:

1. Proveďte rešerši možných způsobů analýzy vzorků metodou SIMS s důrazem na využití řezů vzorků.
2. Navrhněte úpravu stávajícího manipulátoru, aby umožňoval rotaci vzorku min o 45°.
3. Optimalizujte a popište postupy přípravy řezů vzorků a jejich analýzy.
4. Proveďte testovací měření aplikovatelné pro použití v elektrotechnickém průmyslu.

Seznam doporučené literatury:

HEIDE, P., Secondary ion mass spectrometry an introduction to principles and practices, John Wiley & Sons, Inc., 2014.

CUI, Z., Nanofabrication, Principles, Capabilities and Limits, Springer, 2008.

REIMER, L., Scanning Electron Microscopy, Physics of Image Formation and Microanalysis, Springer, 1998.

BALIGA, B. J., Fundamentals of Power Semiconductor Devices, Springer, 2008.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 9. 11. 2017



prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá možnosťami štúdia polovodičových súčastok pomocou metódy SIMS s dôrazom na testovanie rôznych parametrov merania a rôznych spôsobov prípravy vzoriek. V rámci tejto práce bol navrhnutý a otestovaný držiak vzorky kompatibilný s používaným zariadením ToF-SIMS⁵ od spoločnosti IONTOF, ktorý je schopný nakláňať vzorky o definovaný uhol voči vodorovnej rovine. Tento držiak umožňuje opracovávanie vzoriek v hlavnej komore zariadenia ToF-SIMS⁵ bez nutnosti presunu vzorky medzi zariadeniami a držiakmi. Tento držiak bol použitý k opracovaniu hrany vzorky TIGBT tranzistora a zobrazeniu hrany krátera predchádzajúceho merania. Na TIGBT tranzistoroch boli zobrazované vnútorné štruktúry na rezoch pripravovaných rôznymi spôsobmi. Ďalej boli optimalizované parametre merania tenkých vrstiev na molybdén-kremíkovom multivrstvovom Röntgenovom zrkadle a na indiových multivrstvách v GaN, kde bol pozorovaný vplyv teploty vzorky behom merania SIMS na výsledné hĺbkové profily.

Summary

This thesis studies possible methods of semiconductor sample measurement by SIMS, with emphasis on testing different measurement parameters and sample preparation. Part of this master thesis deals with the design of a modified sample holder compatible with the used ToF-SIMS⁵ instrument, IONTOF company, which is capable of tilting the sample by defined angle. This holder enables sample preparation in the main chamber of the instrument without the need of transferring the sample between instruments. This sample holder was tested by ion machining of TIGBT sample edge and by imaging of a crater edge, created in previous measurement. TIGBT structures were cut by different techniques and measured the SIMS. Further measurements with the goal of optimizing the depth resolution for thin layers were done on molybdenum-silicon-multilayer X-Ray Mirror. Part of the measurements was focused on comparing depth profiles measured at low temperatures. For these measurements the samples with indium multilayers in GaN substrate were used.

Klíčová slova

SIMS, ToF, TIGBT, dopovanie, polovodič, UHV, multivrstva, rez, In-GaN kvantová jama, ión, hĺbkový profil, 3D hĺbkový profil

Keywords

SIMS, ToF, TIGBT, doping, semiconductor, UHV, multilayer, cross section, In-GaN quantum well, ion, depth profile, 3D depth profile

KARLOVSKÝ, J. *Příprava řezů vzorků a jejich analýza metodou SIMS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 62 s. Vedoucí Ing. Petr Bábor, Ph.D.

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu s názvom **Příprava řezů vzorků a jejich analýza metodou SIMS** vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce s použitím odbornej literatúry a ďalších zdrojov, ktoré sú uvedené v zozname literatúry na konci tejto práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil žiadne autorské práva tretích osôb, ani som nedovoleným spôsobom nezasiahol do cudích autorských práv osobnostných a som si naplno vedomí následkov porušenia ustanovenia § 11. a nasledujúcich autorského práva zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne

.....

Bc. Juraj Karlovský

Ďakujem Ing. Petru Báborovi Ph.D. za vedenie tejto diplomovej práce pomoc s experimentami a konzultovanie návrhu držiaka vzorky. Nemalá vďaka patrí aj Ing. Michalovi Potočkovi Ph.D. za pomoc s meraniami a nápady pre testovacie merania navrhnutého držiaka.

Ďakujem tiež svojim spolužiakom, obzvlášť Bc. Mojírovi Komorovi a Bc. Michalovi Andráskovi za podporu a veľa dobrej nálady aj v náročných okamihoch. Nemalá vďaka patrí aj mojej rodine za podporu pri riešení problémov spojených s vypracovávaním tejto práce.

Tato práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CEITEC Nano (ID LM2015041, MŠMT, 2016–2019) , CEITEC Vysoké učení technické v Brně.

Bc. Juraj Karlovský

Obsah

1	Úvod	3
2	Súčasný stav problematiky	4
2.1	IGBT	5
2.1.1	História štruktúry IGBT	5
2.1.2	Štruktúra a činnosť IGBT	6
2.1.3	Trench hradlová IGBT štruktúra	7
2.1.4	Okrajová ukončovacia štruktúra	8
2.2	Tenké vrstvy	10
2.2.1	Rast tenkých vrstiev	11
2.2.2	Fyzikálna depozícia z plynnej fázy, PVD	13
2.2.3	Chemická depozícia z plynnej fázy, CVD	14
3	ToF SIMS	15
3.1	Fyzikálny princíp SIMS	16
3.1.1	Generácia signálu v SIMS	17
3.2	Tubusy primárneho zväzku	17
3.2.1	Zdroje s povrchovou ionizáciou, FI zdroje	19
3.2.2	Zdroje s ionizáciou polom, LMIG	19
3.2.3	Duoplazmatron	20
3.3	Tubusy sekundárnych iónov	20
3.3.1	Kvadrupólový hmotnostný filter	21
3.3.2	Magnetický sektor	21
3.3.3	Filtre doby letu, ToF	22
3.4	IONTOF ToF-SIMS ⁵	22
4	Metódy tvorby rezov	24
4.1	Mechanická tvorba rezov	24
4.1.1	Rezanie	25
4.1.2	Prichytenie vzorky	26
4.1.3	Brúsenie	26
4.1.4	Leštenie	27
4.2	Chemická tvorba rezov	27
4.3	Fyzikálna tvorba rezov	27
4.4	Meranie TIGBT štruktúr	28
5	Meranie tenkých vrstiev	34
5.1	Testovanie parametrov primárneho zväzku na Röntgenovom zrkadle	34
5.1.1	Porovnanie drsnosti povrchu	39
5.2	Merania In-GaN kvanových jám	40
5.2.1	Vzorka 32	40
5.2.2	Vzorka 62	42
6	Návrh rotačného držiaka vzoriek	46
6.1	Použité materiály	46
6.2	Základný tvar	47
6.2.1	Systém náklonu	47

OBSAH

6.3	Držiak s elektrickým náklonom vzoriek	49
6.3.1	Výsledné vyhotovenie	51
7	Testovanie rotačného držiaka vzoriek	52
7.1	Opracovávanie hrany primárnym zväzkom	52
7.2	Skúmanie hrany krátera	54
8	Záver	56
	Literatúra	56
	Zoznam skratiek	60
	Zoznam príloh	62

1. Úvod

Polovodičové súčiastky našli uplatnenie v širokej škále aplikácií, od diskretných súčiastok až po integrované obvody moderných procesorov počítačov. Pri výrobe polovodičových súčiastok je potrebné kontrolovať kvalitu jednotlivých vnútorných prvkov týchto súčiastok. Pre túto kontrolu je možné použiť veľké množstvo analytických metód.

Jednou z metód, schopných analyzovať prvkové zloženie takýchto štruktúr je metóda SIMS¹. Táto metóda má dostatočnú citlivosť pre študovanie slabo dopovaných vrstiev v kremíkových čipoch. Preto je vhodné jej širšie uplatnenie v polovodičovom priemysle, hlavne v oblasti analýzy defektov vo výrobe a vadných súčiastok².

Táto práca sa zameriava na optimalizáciu parametrov merania tenkých vrstiev prítomných v takýchto zariadeniach. Cieľmi práce bolo zvládnutie meraní na prístroji ToF-SIMS⁵, navrhnutie modifikácie držiaka vzorky tohto zariadenia a jeho testovanie. Tento držiak má umožniť náklon vzorky o definovaný uhol v hlavnej komore zariadenia ToF-SIMS⁵. Plánované využitie tohto držiaka bude pre opracovávanie vzoriek iónovými zdrojmi, predovšetkým v blízkej budúcnosti zakúpeným gáliovým zdrojom.

Úvodná teoretická časť popisuje súčasný stav problematiky výkonových polovodičových súčiastok so zameraním na štruktúru TIGBT³. Je popísaná základná činnosť takéhoto tranzistora a sú uvedené možné tvary planárnej okrajovej ukončovacej štruktúry používanej v takýchto súčiastkach. Ďalej je popísaný rast tenkých vrstiev používaných v polovodičovom priemysle so základnými metódami prípravy týchto vrstiev. Nasleduje časť popisujúca činnosť zariadenia SIMS. V tejto časti sú rozobraté hlavné komponenty prístroja s bežne používanými zdrojmi iónov a príkladmi najčastejšie používaných iónov pre analýzu. Taktiež sú tu popísané základné typy analyzátorov signálu. V závere tejto kapitoly je popísaný používaný prístroj ToF-SIMS⁵.

Experimentálna časť sa zaoberá rôznymi spôsobmi tvorby rezov vzoriek. Uvedené sú predpoklady pre dosiahnutie kvalitného povrchu a najčastejšie používané postupy. Sú prezentované dosiahnuté výsledky tvorby rezov a ich následná štúdia metódou SIMS. Boli robené merania pre optimalizáciu parametrov pozorovania tenkých vrstiev na vzorke MoSi Röntgenového zrkadla a na In-GaN štruktúrach.

Pre analýzu vzoriek s nedefinovaným povrchom a pre tvorbu rezov in-situ, bol vyrobený modifikovaný držiak vzoriek kompatibilný s prístrojom ToF-SIMS⁵. Tento držiak bol testovaný pre kompatibilitu s UHV⁴ a následne boli robené merania pre overenie funkčnosti držiaka vytvorením rezu do TIGBT tranzistora a pozorovaním steny krátera.

¹Hmotnostná spektroskopia sekundárnych iónov, anglicky Secondary Ion Mass Spectrometry

²Takzvané Failure Analysis, FA.

³Trench Insulated Gate Bipolar transistor - bipolárny tranzistor s trench izolovaným hradlom.

⁴Ultra vysoké vákuum, anglicky: Ultra High Vacuum, UHV.

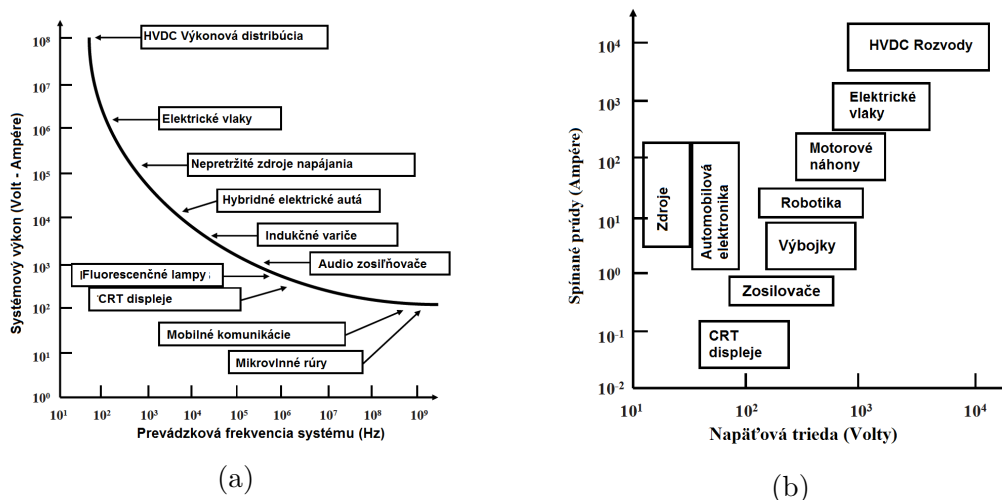
2. Súčasný stav problematiky

Od začiatku druhej polovice minulého storočia prišlo k búrlivému rozvoju fyziky pevných látok, čo umožnilo aj obrovský rozvoj polovodičovej techniky a technológie. Súčasná technológia polovodičov umožňuje produkciu širokej palety súčiastok od diskretných až po integrované obvody procesorov počítačov. Tento trend je úzko spätý so zmenšovaním rozmerov vyrábaných súčiastok. Zmenšovanie súčiastok umožňuje produkciu väčšieho množstva elektronických elementov na jednom čipe respektíve substráte. Doterajší vývoj ilustruje Mooreov zákon škálovania, ktorý hovorí, že počet tranzistorov v integrovaných obvodoch sa každé dva roky zdvojnásobí [1]. Neustále zmenšovanie rozmerov súčiastok viedlo k dosiahnutiu limitov možných rozmerov a vlastností materiálov, z ktorých sú jednotlivé komponenty vyrobené. Preto je nevyhnutné mať možnosť kontrolovať proces výroby polovodičových súčiastok a ich parametre s dostatočnou citlivosťou. Tento trend neustáleho zmenšovania sa výrazne spomalil v nedávnej minulosti [2].

Podobne ako pri integrovaných obvodoch, aj pri výkonových polovodičových súčiastkách došlo k podstatnému rozšíreniu aplikácii. Toto má za následok vznik širokého množstva rôznych druhov súčiastok schopných pracovať v diametrálne odlišných prostrediach. Túto širokú škálu zariadení je možné rozdeliť:

1. Podľa spínaného výkonu v závislosti na spínacej frekvencii.
2. Ako závislosť spínaného prúdu na prevádzkovom napätí.

Tieto dve charakteristiky sú na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Rozdelenie vyrábaných zariadení podľa spínaného výkonu v závislosti na frekvencii (a). Rozdelenie zariadení podľa spínaného prúdu v závislosti na spínanom napätí (b). Prevzaté a upravené z [3] a [4].

Z prvej charakteristiky je vidieť, že existujú polovodičové prvky schopné spínať výkony $P \approx 10^2$ W na mikrovlnných frekvenciách po výkony $P \approx 10^2$ MW pri nízkych frekvenciách.

V súčasnosti sa výkonové polovodičové súčiastky využívajú v širokej škále aplikácií, od dopravných technológií po komunikačné zariadenia. Jednou z takýchto súčiastok je IGBT¹. IGBT sú rozšírené pre ich výhodné kombinovanie vlastností bipolárnej štruktúry a štruktúry MOSFET². Vďaka tomu vznikla široká škála čipov s IGBT štruktúrou, ktoré sú

¹Insulated Gate Bipolar Transistor, bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom

²Z anglického Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

schopné pracovať pri napätiach od rádoov stoviek voltov po niekoľko kilovoltov. Tieto čipy sa používajú v domácich spotrebičoch ako regulátory otáčok elektromotorov, napríklad v pračkách. V doprave sa používajú v elektromobiloch, hybridných automobiloch a v lokomotívach na reguláciu otáčok trakčných motorov [5].

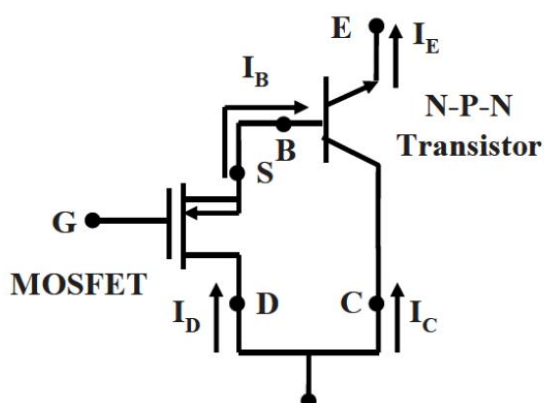
2.1. IGBT

2.1.1. História štruktúry IGBT

Návrh štruktúry IGBT bol vypracovaný v osemdesiatych rokoch minulého storočia.

Pred objavom IGBT sa v aplikáciách nad 1 kHz používali bipolárne tranzistory, ktoré majú dobré prevádzkové charakteristiky pri malých stratách napätia. Pri vysokých napätiach však poskytujú len malý prúdový zisk, preto nemohli byť takéto tranzistory ovládané riadiacimi jednotkami vo forme integrovaného obvodu [6]. Toto stimulovalo vývoj štruktúry MOSFET, ktorá je riadená napäťovo³. Jej nevýhodou je, že pri konštrukcii pre spínanie vysokého napätia (už pri napätiach nad 200 V) rastie jej odpor nad prijateľné medze, čo znemožňuje použitie MOSFET pre vysoké napätia.

Kombináciou vlastností bipolárneho tranzistora a MOSFET tranzistora sa využila vysoká prúdová hustota a nízky úbytok napätia bipolárneho tranzistora, s jednoduchosťou ovládania hradlom⁴ pomocou MOS štruktúry. Najjednoduchšia metóda výroby takejto štruktúry je zapojenie dvoch diskretných súčiastok: MOSFET tranzistora a bipolárneho tranzistora do Darlingtonovho zapojenia, obrázok 2.2.



Obr. 2.2: Schéma Darlingtonovho zapojenia MOSFET a NPN bipolárneho tranzistora do štruktúry IGBT. Vyznačený je tok prúdov a výstupy jednotlivých tranzistorov. Prevzaté z [3].

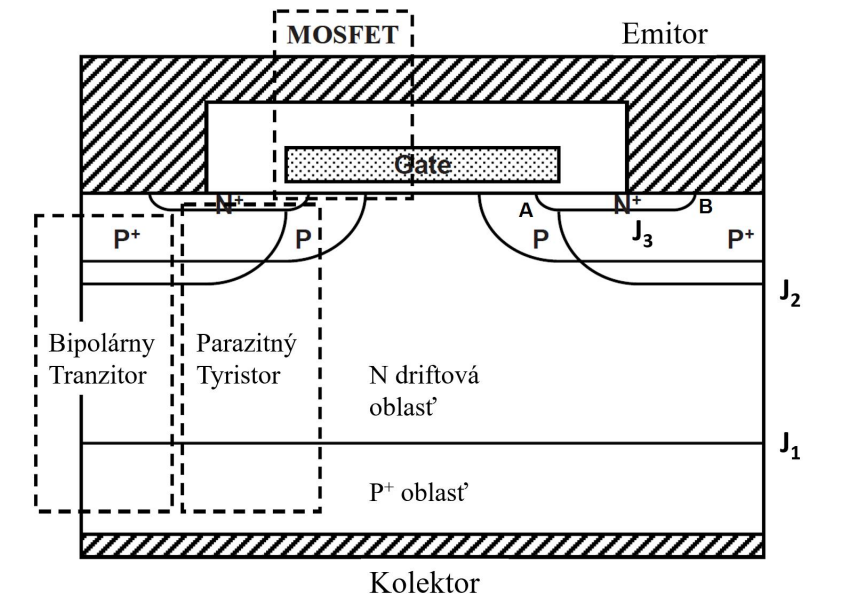
V Darlingtonovom zapojení dodáva MOSFET tranzistor, po pripojení napätia na jeho hradlo, bázový prúd pre zopnutie bipolárneho tranzistora. Toto zariadenie má vysokú vstupnú impedanciu MOS štruktúry, väčšina spínaného prúdu tečie cez bipolárny tranzistor riadený bázovým prúdom dodávaným vysokonapäťovým výkonovým MOSFET tranzistorom. Výsledná prúdová hustota sa pohybuje medzi hodnotou pre bipolárny tranzistor (typicky 50 Acm^{-2}) a hodnotou pre MOSFET tranzistor (typicky 10 Acm^{-2}). K ďalšiemu vývoju Darlingtonovho zapojenia nedošlo, lebo sa opieralo o využitie diskretných súčiastok.

³Prúd potrebný na hradle- Gate na zopnutie je zanedbateľný.

⁴Anglicky Gate.

2.1.2. Štruktúra a činnosť IGBT

V reze sa štruktúra IGBT podobá na MOS hradlový tyristor, obrázok 2.3. IGBT je navrhovaný tak, aby nedochádzalo k regeneratívnemu zopnutiu, ktoré je vlastné vstavanej štvorvrstvovej štruktúre tyristora. Z koncepčného hľadiska bolo pri vývoji IGBT prelomové, že MOS hradlo môže byť použité k vytvoreniu vodivostného kanála (inverznej vrstvy) spájajúceho N^+ emitor s N oblasťou, bez regeneratívneho zahĺtenia parazitickej tyristorovej štruktúry. Tým že spodný prechod J_1 je zapojený v priepustnom smere v zopnutom stave, môže v IGBT dochádzať k toku prúdu týmto prechodom. Toto poskytuje plno hradlovo ovládanú výstupnú charakteristiku.



Obr. 2.3: Rez IGBT štruktúrou so znázornenými hlavnými komponentami. Prevzaté a upravené z [3].

Obrázok 2.3 znázorňuje rez štruktúrou IGBT. V takejto štruktúre netečie prúd, ak je na kolektor privedené záporné napätie vzhľadom k emitoru. Prechod J_1 je záverne polarizovaný, prechod J_1 teda udáva závernú charakteristiku zariadenia. Ak je na kolektor privedené kladné napätie vzhľadom k emitoru a hradlo je vodivo spojené s emitorom je prechod J_2 záverne polarizovaný a IGBT blokuje v priepustnom smere. V oboch prípadoch sa ochudobnená zóna⁵ rozširuje do N driftovej oblasti v objeme čipu, dôsledkom toho je, že voltampérové⁶ charakteristiky v priepustnom a závernom smere sú pre štruktúru na obrázku 2.3 približne rovnaké. Následné rozdiely vo VA charakteristike prameňa z okrajových ukončovacích štruktúr.

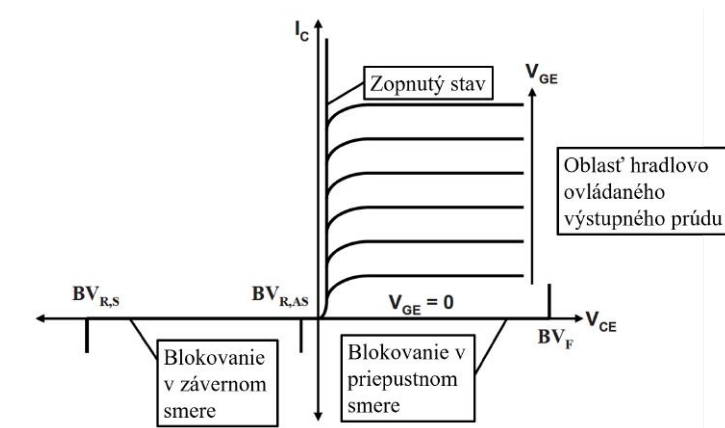
Pri zapojení IGBT v priepustnom smere sa na hradlo privedie kladné napätie dostatočnej veľkosti na to, aby v P oblasti pod hradlom (obrázok 2.3) došlo k vytvoreniu inverznej vrstvy, súčiastka sa dostane do zopnutého stavu. Elektróny prechádzajú z N^+ oblasti emitora do N driftovej oblasti. Tento prúd elektrónov funguje ako básový prúd pre vertikálny P-N-P tranzistor. Keďže prechod J_1 je zapojený v priepustnom smere, oblasť s P^+ dopáciou dodáva diery do N driftovej oblasti. Po pripojení dostatočne vysokého napätia na emitor koncentrácia dier dodávaných z P^+ oblasti presiahne prirodzenú dopáciu N driftovej oblasti a charakteristika IGBT sa bude podobat charakteristike P-i-N diódy

⁵Oblasť priestorového náboja - OPN.

⁶Skrátene VA.

zapojenej v priepustnom smere. Priamym dôsledkom je, že IGBT je schopný pracovať pri vysokých prúdových hustotách.

Ak bude na hradlo aplikované nižšie napätie, blížiac sa prahovému napätiu⁷, dochádza k priškrteniu⁸ vodivostného kanála a elektrónový prúd týmto kanálom je saturovaný. Pretože tento prúd je básový prúd pre P-N-P tranzistor, tak aj prúd dier cez N driftovú oblasť je limitovaný. IGBT pracuje s nasýteným prúdom v aktívnej oblasti s hradlovo ovládaným výstupom. Príklad celej VA charakteristiky je na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Voltampérová charakteristika IGBT. Prevzaté a upravené a upravené z [3].

Pre prepnutie IGBT zo zapnutého stavu do vypnutého je potrebné skratovať hradlo a emitor, vtedy je na hradle nulové napätie. Toto spôsobí, že zanikne inverzná vrstva v P dopovanej oblasti pod hradlom, tým dochádza k zablokovaniu prísunu elektrónov z N^+ emitorovej oblasti do N driftovej oblasti. Dôjde k poklesu spínaného prúdu a následne k exponenciálnemu poklesu kolektorového prúdu, čím sa IGBT vypne [3], [4], [7].

Výhody IGBT štruktúry sú:

- vysoká prúdová hustota v zopnutom stave,
- nízky radiaci príkon vďaka MOS radiacej štruktúre,
- schopnosť hradlového ovládania vypnutia tranzistora,
- plne hradlovo ovládaná výstupná charakteristika s rozsiahlou oblasťou bezpečnej činnosti,
- schopnosť blokovat vysoké napätia v závernom aj priepustnom smere.

2.1.3. Trench hradlová IGBT štruktúra

Z vývoja štruktúry MOSFET je známe, že použitím rôznych tvarov hradla sa dajú zlepšiť výstupné charakteristiky. Jedným z tvarov je UMOS tento má na rozdiel od DMOS hradla tvar písmena U. Zlepšenie je výsledkom eliminácie parazitnej JFET⁹ štruktúry. V IGBT tvorí úbytok napätia na MOSFET časti len malé percento z celkového úbytku napätia, väčšina toho úbytku je na N driftovej oblasti. Toto vyplýva z veľkosti prúdov tečúcich cez MOS kanál a P-N-P tranzistor, vďaka veľkému prúdovému zisku bipolárneho

⁷Prahové napätie je minimálne napätie potrebné pre vznik invetznnej vrstvy v oblasti pod hradlom.

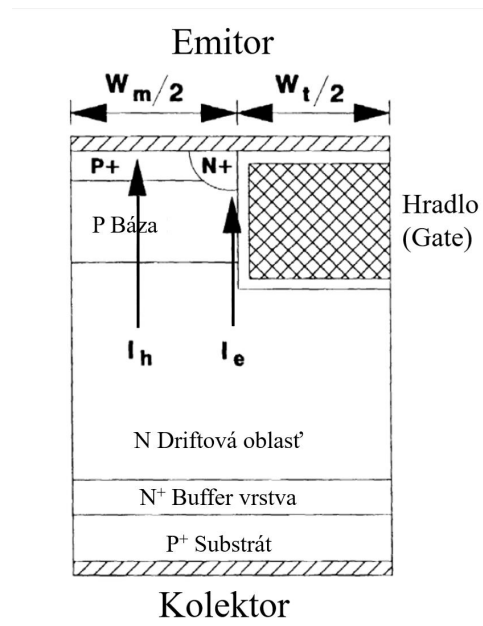
⁸Anglicky pinched-off, [3].

⁹Z angl.: Junction Gate Field Effect Transistor.

2.1. IGBT

tranzistora. Keď sa ale zvýši spínacia frekvencia, dochádza k zníženiu prúdového zisku bipolárneho tranzistora a zvýšeniu prúdu tečúceho cez MOS kanál. Preto je výhodné znížiť úbytok napätia tejto časti. Jednou z metód je práve zmenenie štruktúry DMOS na UMOS, výsledkom je Trench¹⁰ IGBT (TIGBT) štruktúra. Rez takouto štruktúrou je na obrázku 2.5.

Podobne ako pre MOSFET s trench hradlovou štruktúrou, aj v prípade IGBT musí trench presahovať P báзовú oblasť, pre vytvorenie vodivostného kanálu medzi N⁺ emitorovou oblasťou a N driftovou oblasťou pri kladnom napätí na hradle.



Obr. 2.5: Rez štruktúrou Trench IGBT, so znázornenými vrstvami a trasami elektrónov (I_e) a dier (I_h) v štruktúre. Prevzaté a upravené z [3].

Z trás elektrónov na obrázku 2.5 je zrejmé, že v takejto štruktúre sa nenachádza parazitná JFET štruktúra. Ďalšou výhodou tejto štruktúry je veľkosť jednotlivých buniek pri použití UMOS usporiadania, čo vedie k tesnejšiemu rozostupu medzi jednotlivými bunkami, čoho výsledkom je až pätnásobné zvýšenie prúdovej hustoty v zariadení. Pre zariadenia s dlhou dobou života je výsledný úbytok napätia použitím UMOS štruktúry hradla $U = 1.2\text{ V}$ pri prúdovej hustote $\rho_I = 200\text{ Acm}^{-2}$, oproti $U = 1.8\text{ V}$ pre DMOS štruktúru hradla [3] a [8].

2.1.4. Okrajová ukončovacia štruktúra

Analýza planárnych prechodov poskytuje údaje o hornej hranici prierazného napätia výkonových súčiastok. Reálne súčiastky sú limitované vysokými elektrickými poľami vznikajúcimi v objeme čipu, alebo na jeho okrajoch. Pre maximalizáciu záverného napätia je teda nutná štruktúra, ktorá zaistí ukončenie fyzického čipu spôsobom, pri ktorom sa minimalizuje vznik oblastí vysokej intenzity elektrického poľa v čipe. V dnešnej dobe existuje veľké množstvo okrajových ukončovacích štruktúr, tieto sa ale dajú rozdeliť do dvoch kategórií:

¹⁰Trench – Štruktúra pozostávajúca z veľkého množstva tených, hlbokých a paralelných brázd na povrchu čipu.

- Planárne ukončovacie štruktúry, založené na implantácii dopujúcich prvkov cez masky.
- Kuželovité ukončovacie štruktúry, založené na selektívnom odstránení materiálu z okraja čipu.

Vo vysokonapäťových súčiastkach sa prevažne používajú planárne okrajové ukončovacie štruktúry.

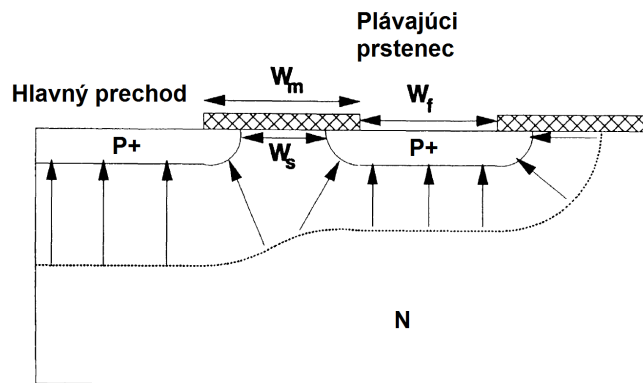
2.1.4.1. Planárne ukončovacie štruktúry

Pre výkonové polovodičové súčiastky s planárnymi plytko implantovanými vrstvami, ktoré nemajú okrajovú ukončovaciu štruktúru, dochádza k zníženiu prierného napätia. Čo je spôsobené zvýšením intenzity elektrického poľa na cylindrických a sférických častiach prechodov. Riešením toho problému je umiestnenie plávajúcich prstencov¹¹ správneho typu dopujúceho prvku do blízkosti okraja hlavného P-N prechodu. Ich potenciál je určený podľa napätia na hlavnom prechode zo vzdialenosti prstenca od toho prechodu ako:

$$V_{pp} = \sqrt{\frac{2qN_A}{\epsilon_s} W_s^2 V_a} + \frac{qN_A}{2\epsilon_s} W_s^2 \quad (2.1)$$

kde W_s je vzdialenosť prstenca od hlavného prechodu a V_a je napätia na hlavnom prechode. Keď je plávajúci prstenec v OPN hlavného prechodu, je hodnota jeho potenciálu medzi hodnotou aplikovaného napätia V_a a nulou, definovaná podľa vzťahu 2.1. Cieľom je rozšírenie OPN a zníženie intezity elektrického poľa na cylindrických častiach.

Vo všeobecnosti môže byť hĺbka plávajúceho prstenca rôzna od hĺbky hlavného prechodu, väčšinou je ale tento robených súčasne s hlavným prechodom, jeho hĺbka je rovnaká. Dôležité je ale aby vzdialenosť W_s bola konštantná po celom obvode prstenca. Rez P-N prechodu obsahujúceho takýto plávajúci prstenec je na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Schématický rez P-N prechodu obsahujúceho plávajúci prstenec ako okrajovú ukončovaciu štruktúru. W_m je šírka masky, W_f šírka okna implantácie a W_s je vzdialenosť výsledného prstenca od hlavného prechodu. Prevzaté a upravené z [3].

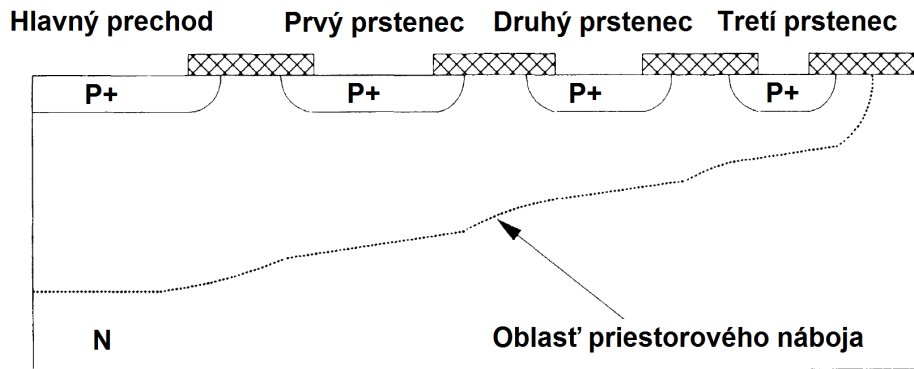
Prstenec musí byť umiestnený v správnej vzdialenosti od prechodu, inak nedôjde k zvýšeniu prierného napätia. Ak je prstenec príliš ďaleko dôjde k prerazu ešte pred tým ako sa OPN rozšíri až po prstenec, ak je príliš blízko je tento prstenec na rovnakom napätí ako hlavný prechod a teda nedochádza k zvýšeniu prierného napätia. Pre určenie správnej polohy sa vyšetruje krivka závislosti prierného napätia na vzdialenosti plávajúceho prstenca.

¹¹Názov plávajúci prstenec vychádza z neprítomnosti elektrického kontaktu na túto štruktúru.

2.2. TENKÉ VRSTVY

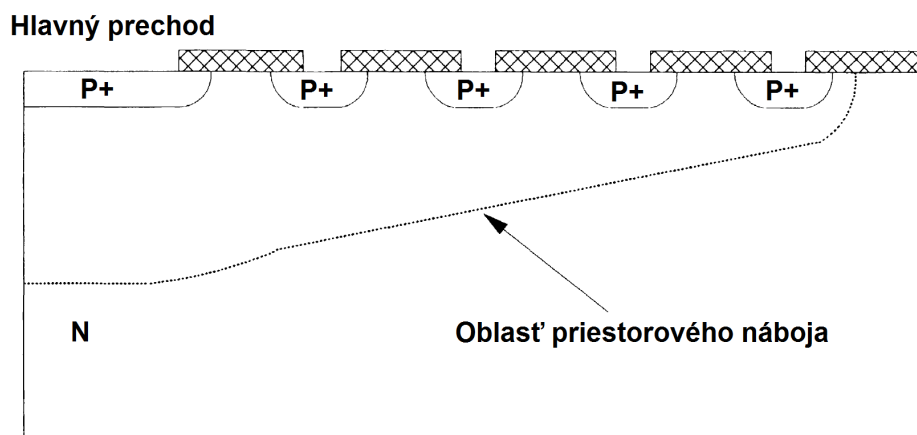
Ak jeden prstenec zvýši prierazné napätie o istú hodnotu, viacero takýchto prstencov ju zvýši ešte viac, až po hranicu, kedy dochádza k prierazu v hlavnom P-N prechode. Podobne ako v prípade jedného prstenca sa aj viacero prstencov vyrába spolu s hlavným prechodom. V takomto prípade sa používajú dva základné návrhy.

V prvom návrhu, obrázok 2.7 sa mení šírka a vzájomná vzdialenosť týchto prstencov. So vzdalovaním sa od hlavného prechodu sa vzdialenosť a šírka zmenšujú, výsledkom čoho je redukcia rozmerov okrajovej štruktúry čipov.



Obr. 2.7: Schematický rez okrajovou ukončovaciou štruktúrou obsahujúcou viacero plávajúcich prstencov s meniacimi sa rozmermi a vzdialenosťami. Prevzaté upravené z [3].

Druhý návrh sa opiera o veľké množstvo úzkych prstencov blízko pri sebe, obrázok 2.8. Tento návrh umožňuje umiestniť väčšie množstvo týchto prstencov na jednotku plochy, taktiež tento návrh produkuje jemnejšiu zmenu poľa v okrajovej oblasti. Výsledkom čoho je vyššia odolnosť zariadení na variácie v aplikovanom napätí. Táto štruktúra je taktiež jednoduchšia na návrh a výrobu lebo sa opiera o základné pravidlá návrhu týchto štruktúr. Prevzaté z: [9], [10], [11] a [12]



Obr. 2.8: Schematický rez okrajovou ukončovaciou štruktúrou obsahujúcou viacero plávajúcich prstencov s konštantnými rozmermi a vzdialenosťami. Prevzaté a upravené z [3].

2.2. Tenké vrstvy

Tenké vrstvy sa používajú v širokej škále aplikácií, od antireflexných vrstiev na optických prvkoch fotoaparátov, po hradlové oxidy v moderných počítačových procesoroch. Väč-

šinou sa jedná o dielektrické alebo kovové vrstvy. Z dielektrických vrstiev sa v dnešnej dobe najčastejšie používajú SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , HfO_2 . Kovové vrstvy sa používajú ako kontaktovacie vodiče medzi jednotlivými zariadeniami na substráte alebo ako kontaktovacie plochy pre vonkajšie kontakty. Často používané kovy sú hliník a jeho zliatiny, meď, zlato, v špeciálnych prípadoch sa používajú vodivé oxidy [13].

Tieto vrstvy sa primárne vyrábajú chemickou alebo fyzikálnou depozíciou. Vývoj metód výroby tenkých vrstiev bol spätý s vývojom vákuových technológií, pre nutnosť udržiavania kvality a čistoty deponovanej vrstvy [14].

2.2.1. Rast tenkých vrstiev

Rast vrstiev na povrchu a rozhraní je termodynamický proces, riadený povrchovým napätím a voľnou energiou atómov vrstvy. V termodynamickej rovnováhe je počet kondenzovaných častíc rovný počtu odparených častíc. Pre začatie rastu je túto rovnováhu nutné narušiť.

Rast tenkej vrstvy sa skladá z niekoľkých procesov znázornených na obrázku 2.9.

1. Kondenzácia atómov nanášaného materiálu na povrchu substrátu z tekutej fázy. Tento proces je možné vyjadriť ako tok dopadajúcich atómov na povrch F , prevzaté z [15]:

$$F = \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT_0}} \quad (2.2)$$

kde p je tlak plynnej fázy, m je hmotnosť dopadajúcich častíc, k je Boltzmanova konštanta a T_0 je teplota zdroja.

2. Po dosadnutí častíc na povrch, môže nastať okamžité uvoľnenie späť do vákua, alebo môžu tieto častice difundovať po povrchu a môže dôjsť k ich adsorpcii. Rýchlosť desorpcie častice závisí na sile väzby medzi ním a substrátom a na aktivačnej energii.
3. Po adsorpcii atómu alebo častice na povrchu nasleduje proces difúzie po povrchu substrátu. Pri nízkom počte dopadajúcich atómov sa tento proces dá definovať ako transport atómov po povrchu substrátu, definovaný difúznym koeficientom, prevzaté z [16]:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_m}{kT}\right), \quad (2.3)$$

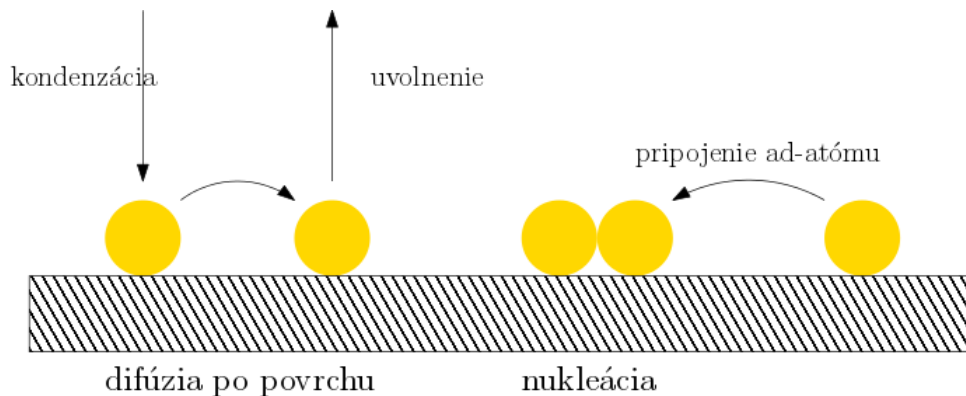
kde D_0 je preexponenciálny faktor difúzie, E_m je energia potrebná na prekonanie migračnej bariéry, k je Boltzmanova konštanta a T je teplota substrátu.

4. Ak dôjde k zrážke medzi pohybujúcimi sa atómami, môže dôjsť k ich spojeniu a vytvoreniu zárodku tzv. nukleácii. Miesta s najväčšou pravdepodobnosťou začiatku nukleácie sa vyznačujú prítomnosťou poruchy na povrchu. Tento proces prebieha až do saturačnej koncentrácie zárodokov na povrchu n_x .
5. Následne dochádza k rastu zárodokov do ostrovčekov, ktorých prepojením vzniká súvislá vrstva. Pri tejto koncentrácii je stredná voľná dráha difundujúcich atómov l rovná vzdialenosti medzi jednotlivými ostrovčekmi. Táto veličina spolu so saturačnou koncentraciou sa dá vyjadriť pomocou pomeru difúzneho koeficientu a toku dopadajúcich atómov na povrch vzorky vzťahom, prevzaté z [16]:

$$l \approx \left(\frac{D}{F}\right)^{\frac{1}{6}}; n_x \sim \left(\frac{D}{F}\right)^{-\frac{1}{3}} \quad (2.4)$$

2.2. TENKÉ VRSTVY

kde D je difúzny koeficient a F je tok dopadajúcich atómov.



Obr. 2.9: Schematické znázornenie fyzikálnych procesov tvorby vrstvy. Prevzaté a upravené z [15] a [17].

Pomer D/F je kľúčovým faktorom pri raste tenkých vrstiev. Ak sa jedná o pomalý rast, difúzny koeficient je mnohonásobne vyšší, ako tok deponovaných atómov, výsledný proces sa nachádza blízko termodynamickej rovnováhy. Naopak, ak tok deponovaných atómov je vyšší ako difúzny koeficient, proces sa nazýva rýchla depozícia, a podmienky rastu sú riadené kinetickými parametrami procesu. Prevzaté a upravené z [15], [17] [16].

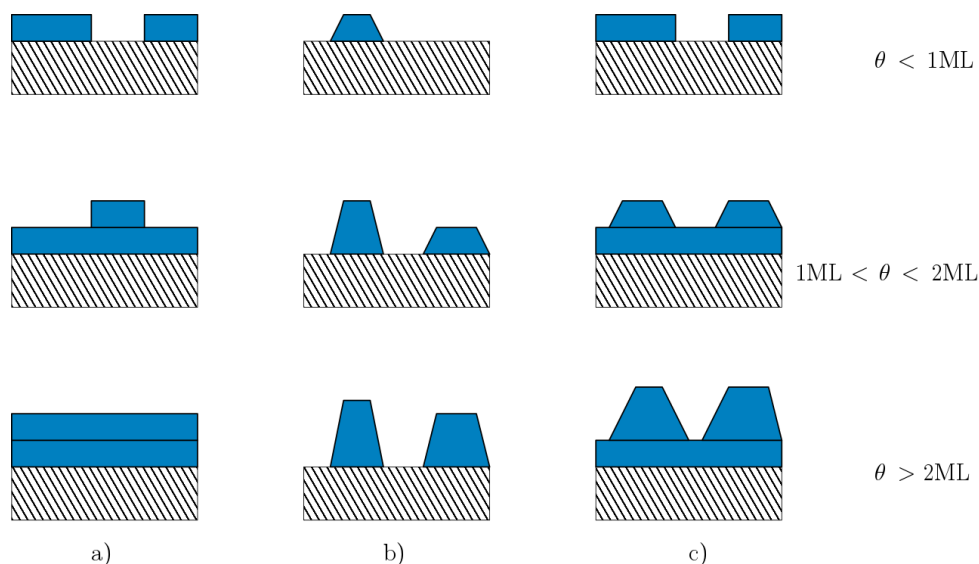
2.2.1.1. Rast kovových vrstiev

Rast kovových vrstiev možno rozdeliť do troch módov uvenevých na obrázku 2.10:

Frank - van der Mervov mód Tiež nazývaný rast vrstvy po vrstve, pri tomto móde rastu sú interakcia medzi substrátom a deponovanou vrstvou silnejšie ako interakčné sily medzi susednými atómami deponovanej vrstvy. Tento fakt vedie k tvorbe novej vrstvy jedine v prípade, že predošlá vrstva je kompletná.

Volmer - Weberov mód Interakčné sily medzi jednotlivými atómami deponovaného materiálu sú väčšie ako tie medzi materiálom a povrchom, čo vedie k zväčšovaniu vzniknutých ostrovčekov, výsledkom je neúplné pokrytie povrchu. Jedná sa o opačný rast ako je Frank-van der Mervov rast.

Stransky - Krastanovov mód Tento mód rastu predstavuje prechod medzi prvými dvoma módmami rastu. Po formácii jednej alebo viacerých monovrstiev, prechádza rast do ostrovčekového módu. Tento mód rastu môže spôsobovať veľa faktorov, jedným z nich je rôznosť mriežkových konštánt substrátu a deponovaného materiálu.



Obr. 2.10: Schematické znázornenie jednotlivých rastových módov. Mód rastu vrstva po vrstve, Frank - van der Merv a), ostrovčekový rast, Volmer - Weber b) a zmiešaný rast, Stransky - Krastanov c). θ predstavuje pokrytie povrchu v monovrstvách (ML). Prevzaté z [15] a [17].

2.2.2. Fyzikálna depozícia z plynnej fázy, PVD

Jedná sa o proces nanášania vrstiev, pri ktorom je nanášaný materiál vyparovaný z pevnej alebo kvapalnej fázy vo forme jednotlivých atómov alebo molekúl. Tieto sú následne prenášané na substrát vo forme pary vo vákuu.

Typicky sa PVD metódy používajú na nanášanie vrstiev s hrúbkou $1 \sim 1000 \text{ nm}$, ale dajú sa s nimi nanášať aj viac komponentové vrstvy, hrubé vrstvy a voľné štruktúry. Je možné nanášať prvky a zliatiny, ako aj zlúčeniny za použitia reaktívnej dekompozície. Pri reaktívnej dekompozícii vznikajú zlúčeniny reakciou deponovaného materiálu so zbytkovou atmosférou, napríklad depozícia titánu v dusíkovej atmosfére dáva TiN, alebo pomocou kodepozície dvoch prvkov, depozícia TiC. Základné PVD metódy sú:

- vákuové naparovanie,
- naprašovanie vo vákuu,
- naprašovanie v plazme,
- iónová depozícia,
- depozícia podporovaná iónovým zväzkom

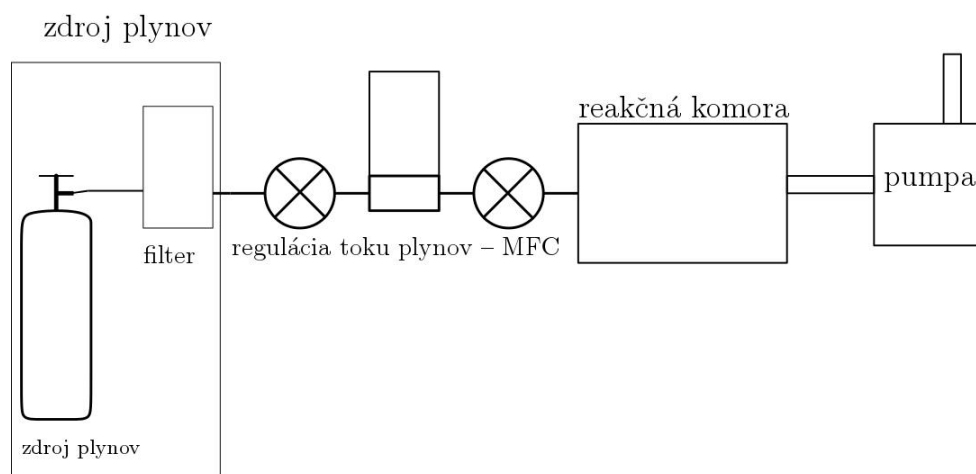
Najčastejšie sa používa vákuové naparovanie a naprašovanie. Základom tejto metódy je odparovanie nanášaného materiálu zo zásobníka v podobe neutrálnych atómov. K odparovaniu dochádza na základe toho, že tlak nasýtených pár materiálu je pri danej teplote vyšší ako je tlak v depozičnej komore. Zahrievanie deponovaného materiálu môže byť pomocou elektrického výhrevného telieska alebo dopadom prúdu energetických elektrónov na povrch materiálu, prevzaté z [18].

2.2.3. Chemická depozícia z plynnej fázy, CVD

V tomto procese plynňý kovový prekursor prechádza chemickou zmenou pri kontakte s povrchom, zanechávajúc vrstvu kovu na povrchu. Keďže prekursor obklopuje substrát zo všetkých strán, dochádza k depozícii na všetky povrchy rovnomerne. Výsledné vrstvy majú konformný charakter. V polovodičovom priemysle sa z chemických metód najviac používa chemická depozícia z plynnej fázy.

Metóda CVD¹² je jedna z najpoužívanějších metód produkcie tenkých vrstiev v polovodičovom priemysle a ďalších odvetviach napriek tomu, že táto metóda je jedna z najzložitejších procesov výroby tenkých vrstiev. Výhodou tejto metódy je vysoká konformita nanášanej vrstvy, to znamená jej schopnosť rovnomerne pokryť povrch so zložitou topografiou rovnomernou vrstvou materiálu. Vrstvy nanesené naparovaním, naprašovaním a inými fyzikálnymi metódami depozície majú vysoký smerový charakter, dobre pokrývajú rovné povrchy, ale zlyhávajú pri pokrývaní trench štruktúr a dier na povrchu. Výsledné vrstvy mávajú vyššie množstvo nečistôt, oproti iným metódam, väčšinou sa jedná o vodíkovú kontamináciu. Táto kontaminácia môže byť niekedy výhodná, napríklad pri depozícií amorfného kremíka, vtedy dochádza k pasivácii voľných väzieb kremíka, tzv. dangling bonds.

Všetky prístroje na CVD v princípe pozostávajú zo zdroja plynov, reakčnej komory, pumpy na čerpanie odpadných plynov a elektroniky na vyhrievanie a kontrolu parametrov v reakčnej komore [19]. Schematický rez komorou CVD je na obrázku 2.11.



Obr. 2.11: Rez základnou štruktúrou CVD prístroja, s vyznačenými základnými prvkami. Prevzaté a upravené z [19].

V reakčnej komore sa používa veľké množstvo konfigurácií a chemických reakcií, ale všetky majú spoločné charakteristiky:

1. Reakčné plyny – prekursor – musia byť zavedené do komory a dopravené k vzorke, s možnými chcenými a nechcenými chemickými reakciami.
2. Teplota vzorky musí byť presne regulovaná, zvyčajne je vysoko nad izbovou teplotou.
3. Chemické reakcie na povrchu vzorky vytvárajú požadovanú vrstvu.
4. Reakčné produkty chemických reakcií musia byť odčerpávané z komory.

¹²Chemical Vapour Deposition

3. ToF SIMS

Základy metódy hmotnostnej spektroskopie sekundárnych iónov¹ boli položené na začiatku dvadsiateho storočia J. J. Thomsonom, ktorý experimentálne zaznamenal prvé sekundárne ióny. Prvý raz bola metóda SIMS experimentálne použitá až v roku 1949. Prvé prístroje s magnetickými sektormi sa objavili až v roku 1960. Tento vývoj je úzko spätý so schopnosťou dosiahnuť dostatočné vákuum potrebné pre analýzu vzoriek a s pochopením potenciálu tejto metódy. Veľká väčšina prvých prístrojov sa zameriavala na vývoj takzvaného dynamického módu SIMS, pre analýzu extraterestriálnych vzoriek a vzoriek pre polovodičový priemysel. V dnešnej dobe má metóda SIMS široké uplatnenie v priemysle a výskume. Využíva sa na určovanie izotopického, prvkového a molekulárneho zloženia na lokalizovaných mikroskopických oblastiach povrchu a tesne pod povrchom pevných látok. V špeciálnych prípadoch je možné analyzovať aj zmrazené kvapaliny.

Popularita metódy SIMS pramení zo:

1. Schopnosti detekovať všetky elementy periodickej tabuľky a ich kombinácie, tzn. molekuly. Vo väčšine prípadov je táto informácia zaznamenaná súčasne z rovnakého povrchu, respektíve objemu.
2. Detekčných limitov, schopnosti detekovať malé koncentrácie, ktoré sú v prípade SIMS až po jednotky častíc na miliardu. Tieto detekčné limity sú v SIMS zariadeniach spojené v vysokým dynamickým rozsahom, ktorý je v prípade použitia viacerých detektorov až do hodnôt $\sim 10^9$.
3. Schopnosti mapovať rozloženie prvkov, izotopov a ich kombinácie na alebo v akejkoľvek pevnej látke s priestorovým a hĺbkovým rozlíšením s hodnotami $\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ alebo menej ($\sim 10\text{ nm}$ je fyzikálny limit priestorového rozlíšenia SIMS) a $\sim 1\text{ nm}$ hĺbkového rozlíšenia.
4. Minimálnej nutnosti prípravy vzoriek pred meraním.

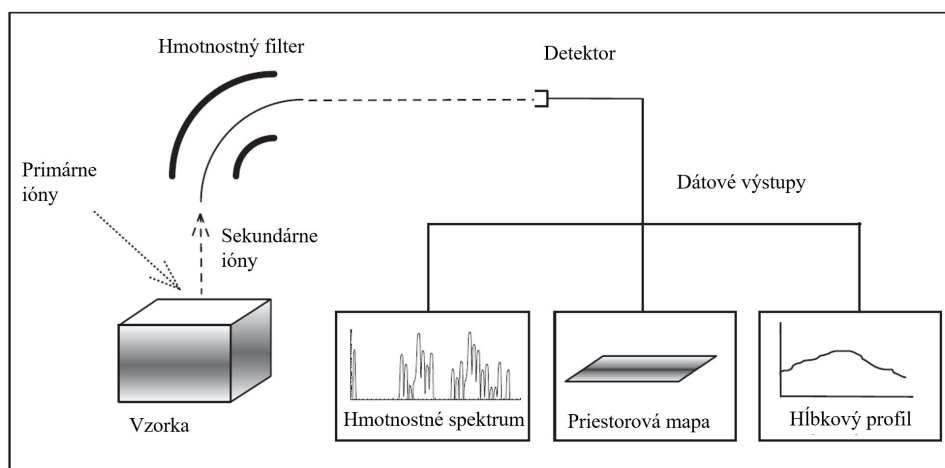
Hlavná nevýhoda spájaná s metódou SIMS je obtiažnosť kvantifikácie nameraných signálov. Toto pramení z faktu, že zaznamenaný signál je často nepredvídateľne ovplyvnený typom substrátu a podmienkami počas analýzy. Výsledkom je, že pre kvantifikáciu je potrebná maticovo spárovaná referenčná vzorka analyzovaná pri rovnakých podmienkach. Toto je hlavný rozdiel, oproti napríklad Röntgenovej fotoelektrónovej spektroskopii² kde ku kvantifikácii netreba maticovo spárovanú referenčnú vzorku.

Hľadaná informácia v SIMS je obsiahnutá v iónoch vylietavajúcich z povrchu vzorky po dopade energetického iónu na jej povrch, ako je zobrazené na obrázku 3.1. Dopadajúce ióny sú nazývané primárne ióny, ióny vyrazené z povrchu sa nazývajú sekundárne ióny.

¹Anglicky Secondary Ion Mass Spectroscopy, skrátene SIMS.

²Anglicky: X-ray photoelectron spectroscopy, XPS.

3.1. FYZIKÁLNY PRINCÍP SIMS



Obr. 3.1: Schéma činnosti zariadenia SIMS so základnými výstupmi, prevzaté a upravené z [20].

Na obrázku 3.1 sú ďalej znázornené základné dátové výstupy SIMS merania:

1. Hmotnostné spektrum všetkých ionizovaných elementov odstránených z povrchu.
2. Priestorová mapa výskytu študovaného signálu.
3. Hĺbkový profil rozloženia intenzity študovaného signálu.

Následným kombinovaním hĺbkového rozloženia s priestorovým rozložením možno mapovať signál v troch dimenziách takzvaný 3D hĺbkový profil. Pre rozdelenie sekundárnych iónov podľa pomeru hmotnosti a náboja m/q sa používajú hmotnostné filtre.

Metódu SIMS je možné rozdeliť podľa druhu merania na:

- statický a
- dynamický SIMS.

Tieto dva módy sa odlišujú v použití a v použitých primárnych iónoch.

Statický SIMS získava informácie o prvkovom zložení z vrchnej neporušenej monovrstvy vzorky. Používa sa na určenie chemického popri prípade molekulárneho zloženia povrchu vzorky, preto sa táto metóda často používa v biovedách pre určovanie molekulového zloženia vzorky.

Dynamický SIMS na druhú stranu získava prvkové zloženie z mnohých atómových vrstiev z hĺbky vzorky. Ako primárne ióny používa Cs^+ , O^- , alebo O_2^+ . Je schopný dosiahnuť detekčných limitov pri analýze prvkového zloženia. Preto našiel dynamický SIMS uplatnenie hlavne v polovodičovom priemysle a mapovaní rozloženia izotopov vo vzorke v geológii a archeológii.

Princíp vzniku sekundárnych iónov je v oboch prípadoch rovnaký. Prevzaté z [20].

3.1. Fyzikálny princíp SIMS

Principiálne sa SIMS považuje za priamočiaru metódu v tom, že fokusovaný iónový zväzok, nazývaný primárny zväzok, je namierený na povrch pevnej látky. Najčastejšie sa jedná o ióny: O^- , O_2^+ , Cs^+ , Ga^+ , In^+ , Au_n^+ , Bi_n^+ , Mn_n^+ , SF_5^+ , C_{60}^+ , C_{84}^+ , $\text{C}_{24}\text{H}_{12}^+$, Ne^+ , Ar_n^+ , Xe^+ ,

kde n značí počet atómov, začína na jedna. Niektoré z týchto iónov môžu byť viacnásobne ionizované.

V praxi sa ale vyskytuje mnoho úskalí, ako výsledok celého spektra možných postupov analýzy pre oba prípady, statický aj dynamický. Tieto úskalia vyplývajú z existencie nespočetných podmienok za ktorých môže SIMS pracovať. Každá z týchto podmienok je optimalizovaná pre analýzu odlišných prvkov alebo molekúl v rôznych matriciach. Toto pramení z problematiky vzniku sekundárnych iónov, takzvaného matricového efektu. Tento efekt popisuje ovplyvňovanie populácie sekundárnych iónov matricou z ktorej vznikajú.

3.1.1. Generácia signálu v SIMS

Generáciou signálu v zariadení SIMS možno rozumieť generáciu analyzovaných sekundárnych iónov.

Ióny primárneho zväzku po dopade vyraňujú z povrchu atómy a molekuly. Tento proces sa nazýva odprašovanie. Malé percento odprášenej populácie, atómov alebo molekúl je ionizovaných, vo väčšine prípadov je výsledná ionizácia stupňa 1: +1 alebo -1. Tieto ióny sú následne zozbierané, fokusované a analyzované hmotnostným analyzátorom. Táto populácia sa nazýva sekundárny zväzok.

3.2. Tubusy primárneho zväzku

Tubus primárneho zväzku je časť prístroja v ktorej dochádza k tvorbe, filtrovaniu, fokusovaniu a smerovaniu primárneho zväzku iónov do požadovaných parametrov a na určené miesto na vzorke. Bežne dostupné prístroje používajú na filtrovanie primárnych iónov hmotnostné filtre, ktoré sa dajú rozdeliť do troch základných skupín:

1. Magnetický filter,
2. Wienov hmotnostný filter,
3. Hmotnostný filter doby letu³.

Základné schémy jednotlivých typov tubusov sú na obrázku 3.2. Tubus s magnetickým filtrom používa magnetické pole, ktoré sa nachádza v dráhe pohybujúcich sa iónov.

Wienov filter využíva skrížené magnetické a elektrické polia.

V oboch prípadoch magnetické pole filtra zakrivuje dráhu prechádzajúcich iónov podľa ich pomeru hmotnosti a náboja m/q podľa rovnice 3.1:

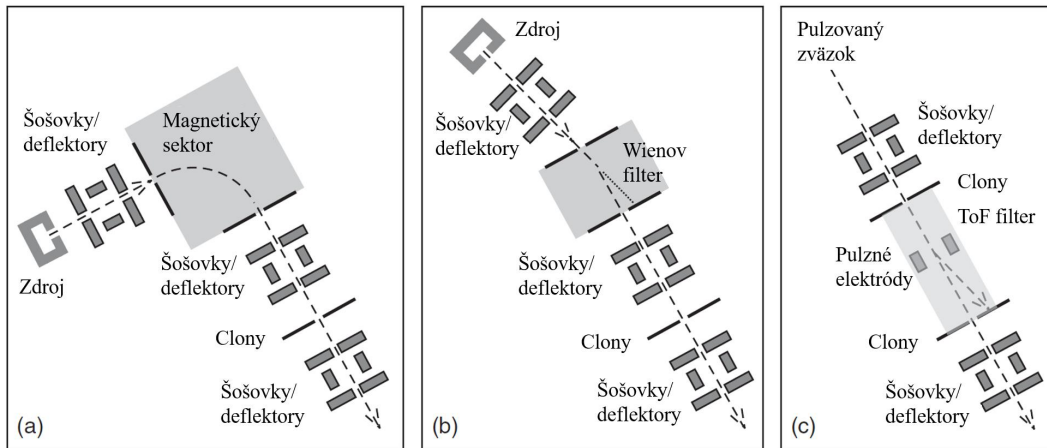
$$r = \frac{mv}{qB} \quad (3.1)$$

kde m značí hmotnosť, q náboj častice, v jej rýchlosť a B intenzitu magnetického poľa. Výsledkom tohto faktu je, že na výstupe magnetického filtra sú prechádzajúce ióny rozdelené podľa pomeru m/q .

Elektrostatické pole vo Wienovom filtri koriguje chod vybraných primárnych iónov cez magnetické pole. V prípadoch Wienovho a ToF filtra je trajektória mimoosová čo slúži na odstránenie prechádzajúcich neutrálnych iónov.

³Anglicky: Time of Flight, ToF

3.2. TUBUSY PRIMÁRNEHO ZVÄZKU



Obr. 3.2: Schematické náčrty rezov primárnych tubusov s rôznymi filtrami primárnych iónov. Tubus s magnetickým sektorom (a), s Wienovým filtrom (b) a filter doby letu, ToF (c). Prevzaté z [20].

ToF filter separuje prechádzajúce ióny v závislosti od ich hmotnosti alebo energie na princípe rôznej rýchlosti. Zo vzťahu pre kinetickú energiu:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.2)$$

kde m je hmotnosť a v rýchlosť častice, je pre ióny s rovnakou energiou ale rôznymi hmotnosťami rýchlosť rôzna. Tieto filtre potrebujú pre činnosť pulznú zväzku, pre definovanie času nula, od ktorého sa počíta doba letu. Rovnica 3.2 taktiež umožňuje separáciu iónov rovnakého prvku s rôznymi stupňami ionizácie, vďaka faktoru že rôzne ionizované ióny sú urýchlené na rôzne energie.

Zvyšná časť primárneho tubusu pozostáva zo šošoviek pre fokusovanie, tvarovanie a rastovanie zväzku po vzorke. Dôležitou časťou tubusu je zdroj iónov. V zariadeniach SIMS sa najčastejšie používajú:

1. Elektrónovo impaktné (EI) zdroje, používajú sa hlavne pre tvorbu pozitívnych iónov inertných plynov a tiež O_2^+ a SF_5^+ . Po modifikácii sa dajú použiť pre tvorbu iónov: C_{60}^+ , C_{84}^+ , $C_{24}H_{12}^+$ a Ar_n^+ , kde n môže byť až niekoľko tisíc.
2. Duoplazmatronové (Duo) zdroje sa primárne využívajú na tvorbu iónov kyslíka O_2^+ a O^- s vyššou efektívnosťou ako EI zdroje.
3. Rádiofrekvenčné (RF) zdroje, sa používajú pre tvorbu rovnakých iónov ako Duoplazmatronové zdroje ale so zvýšenou účinnosťou.
4. Zdroje s povrchovou ionizáciou (SI), sa používajú pre tvorbu iónov alkalických kovov (Cs^+ je najpoužívanejší ión v zariadeniach SIMS).
5. Zdroje s ionizáciou polom (FI) alebo tiež nazývané Iónové zdroje z tekutých kovov⁴ sa používajú pre tvorbu zväzkov o malom priemere stopy iónov napríklad: Ga^+ , In^+ , Au_n^+ , Bi_n^+ , kde n je typicky jedna až sedem a q jedna až tri.

Ďalej je detailnejšie popísaná štruktúra zdrojov LMIS, Duoplazmatron a FI, ktoré sa nachádzajú v použitom prístroji ToF – SIMS⁵. Pre porovnanie s ostatnými zdrojmi je uvedená tabuľka základných parametrov iónových zdrojov ako jasnosť, minimálna veľkosť stopy na vzorke a použiteľný rozsah energií.

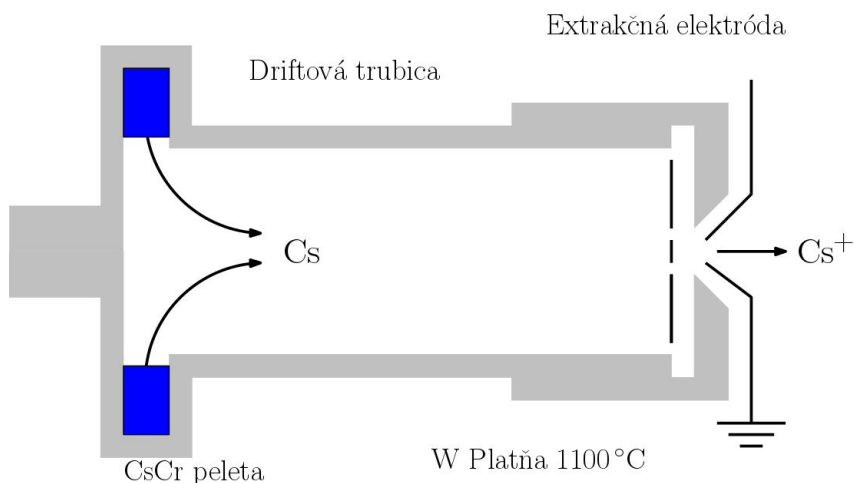
⁴LMIS- z anglického: Liquid Metal Ion Source, alebo LMIG z anglického: Liquid Metal Ion Gun

Tabuľka 3.1: Typické vlastnosti iónových zdrojov používaných v zariadeniach SIMS v optimalizovaných primárnych tubusoch, s príkladmi generovaných iónov. Prevzaté z [20].

Zdroj	Použité ióny	Energia (keV)	Jas ($\text{Am}^{-2}\text{sr}^1\text{V}^{-1}$)	Veľkosť stopy
EI	O_2^+ , SF_5^+ , Ar_n^+ , C_{60}^+	< 40	~ 10 pre Ar^+	$\sim 5 \mu\text{m}$
Duo	O_2^+ , Ar^+ , O^- , atd.	< 17	~ 500 pre O_2^+	$< 0.2 \mu\text{m}$
RF	O_2^+ , Ar^+ , O^- , atd.	< 17	~ 3000 pre O_2^+	$< 0.1 \mu\text{m}$
SI	Cs^+	< 16	~ 100 pre Cs^+	$< 50 \text{ nm}$
FI	Ga^+ , In^+ , Au_n^+ , Bi_n^+	< 30	$\sim 1 \cdot 10^6$ pre Ga^+	$< 10 \text{ nm}$

3.2.1. Zdroje s povrchovou ionizáciou, FI zdroje

Zdroje s povrchovou ionizáciou, FI zdroje sa používajú prevažne v dynamickom režime SIMS, pre ich schopnosť tvoriť zväzky iónov alkalických kovov s vysokou prúdovou hustotou. Formovanie iónového zväzku nastáva za prítomnosti atómov alkalických kovov na zahriatom kove s vysokou výstupnou prácou, ako volfrám. Alkalický kov sa typicky nachádza v pórovitej pelete, nazývanej rezervoár, vo forme uhličitanu cézneho. Rezervoár je zahriaty na teplotu $\sim 400^\circ\text{C}$ pri ktorej dochádza k sublimácii cézia. Atómy cézia dopadajú na zahriatu volfrámovú platňu kde dochádza k ich ionizácii. Typický tvar FI zdroja je na obrázku 3.3.



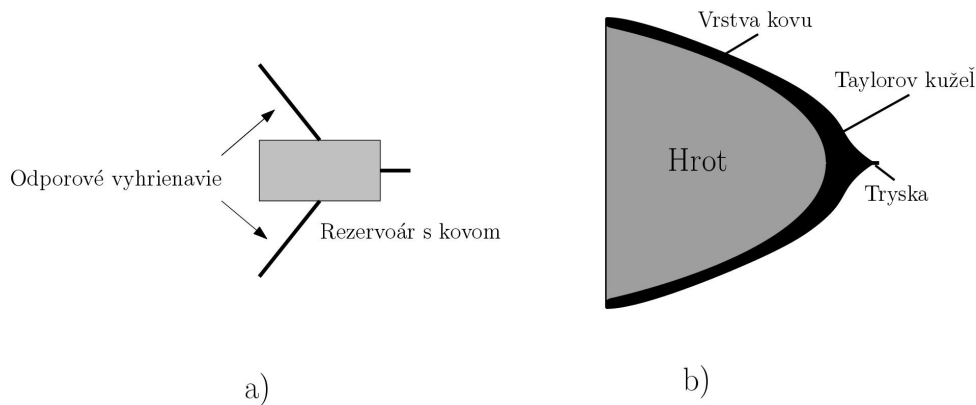
Obr. 3.3: Schematický rez zdroja s povrchovou ionizáciou, prevzaté z [20].

3.2.2. Zdroje s ionizáciou poľom, LMIG

V zariadeniach SIMS zdroje s ionizáciou poľom sa nazývajú aj iónové zdroje z tekutých kovov. Používajú sa na tvorbu kovových iónových zväzkov s malou stopou a veľkou prúdovou hustotou. Ióny kovov majú len minimálny chemický dopad na študovanú vzorku.

Zdroje tohto typu pracujú s roztavenými kovmi, ktoré z rezervoára kapilaritou stekajú na volfrámovú ihlu v podmienkach vysokého vákuu. Volfrámový hrot je držaný na extrakčnom napätí voči extrakčnej elektróde. V prítomnosti extrakčného poľa sú z hrotu vytrhávané ióny kovu, čím dochádza k vyčerpávaniu atómov kovu z hrotu, tieto sú kontinuálne dopĺňané kapilaritou z rezervoára s roztaveným kovom. Typický tvar LMIG zdroja je na obrázku 3.4. Prevzaté z [20], [21] a [22].

3.3. TUBUSY SEKUNDÁRNYCH IÓNOV



Obr. 3.4: Schematický náčrt zdroja LMIG a), detail hrotu s emisnou tryskou a Taylorovým kužeľom b). Prevzaté z [20], [21] a [22].

3.2.3. Duoplazmatron

Duoplazmatron zdroje patria do kategórie zdrojov s tlejivým DC⁵ výbojom. Tieto zdroje sa v zariadeniach SIMS používajú pre tvorbu iónov inertných plynov a iónov kyslíka. Princíp činnosti týchto zdrojov sa opiera o vytvorenie elektrického výboja, plazmy, v požadovanom plyne. Plazma sa dá vytvoriť pomocou elektrického výboja medzi elektródami, alebo bombardovaním elektrónmi zo žeravenej katódy. V oboch prípadoch, je to sústava troch elektród: strednej elektródy, anódy a extrakčnej elektródy (obrázok 3.5).

Medzi strednou elektródou a anódou je vinutá cievka, ktorá vytvára medzi týmito elektródami silné magnetické pole. Táto kombinácia elektrického a magnetického poľa s malými rozmermi dier v oboch elektródach koncentruje vzniknutú plazmu do vysokých hustôt. Z plazmy sú následne extrahované požadované ióny.

Duoplazmatron zdroje poskytujú prúdové hustoty iónov až jednotky A pri výbojových prúdoch desiatok A. Preto je nutné výkonné chladenie takýchto zdrojov. Typický tvar Duoplazmatron zdroja je na obrázku 3.5. Prevzaté z [22], [23]

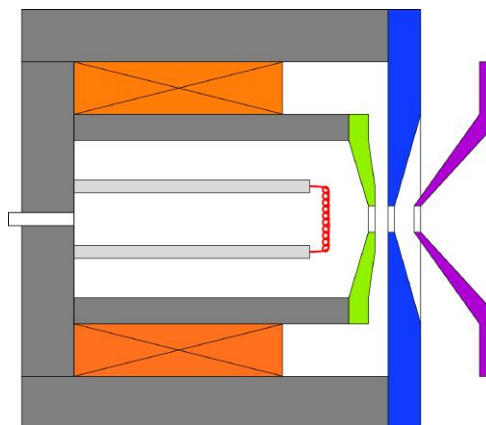
3.3. Tubusy sekundárnych iónov

Tubus sekundárnych iónov je časť prístroja SIMS, v ktorej dochádza k zberu, filtrácii, fokusácii a detekcii iónov vylietavajúcich z povrchu vzorky. Tieto tubusy obsahujú:

1. Elektrostatické šošovky a deflektory, tieto sa používajú na efektívne zbieranie a transport sekundárnych iónov cez tubus.
2. Energiový filter, pre výber skúmaného hmotnostného intervalu.
3. Hmotnostný filter, ktorý rozdeľuje prechádzajúce ióny podľa pomeru m/q , pred ich analýzou.
4. Systém detektorov, ktorý zaznamenáva prúd sekundárnych iónov prechádzajúcich hmotnostným filtrom a v niektorých prípadoch ich priestorové rozloženie.

Tvar tubusu sekundárnych iónov je primárne ovplyvnený hlavne použitým hmotnostným filtrom. Použitý hmotnostný filter v podstate udáva schopnosti daného prístroja. Hmotnostných filtrov existuje veľké množstvo, ale všetky sa dajú rozdeliť podobne ako v prípade tubusov primárneho zväzku do troch základných kategórií:

⁵Jednosmerný prúd, anglicky: Direct Current.



Obr. 3.5: Schematický rez Duoplazmatron zdrojom s naznačenými elektródami: extrakčná elektróda (fialová), anóda (modrá) a stredná elektróda (zelená). Žhavené vlákno je znázornené červenou. Prevzaté a upravené z [22].

- (a) Kvadrupólový hmotnostný filter.
- (b) Magnetický sektor.
- (c) Filter doby letu, ToF.

Schematické rezy tubusov s jednotlivými typmi hmotnostných filtrov sú na obrázku 3.6.

3.3.1. Kvadrupólový hmotnostný filter

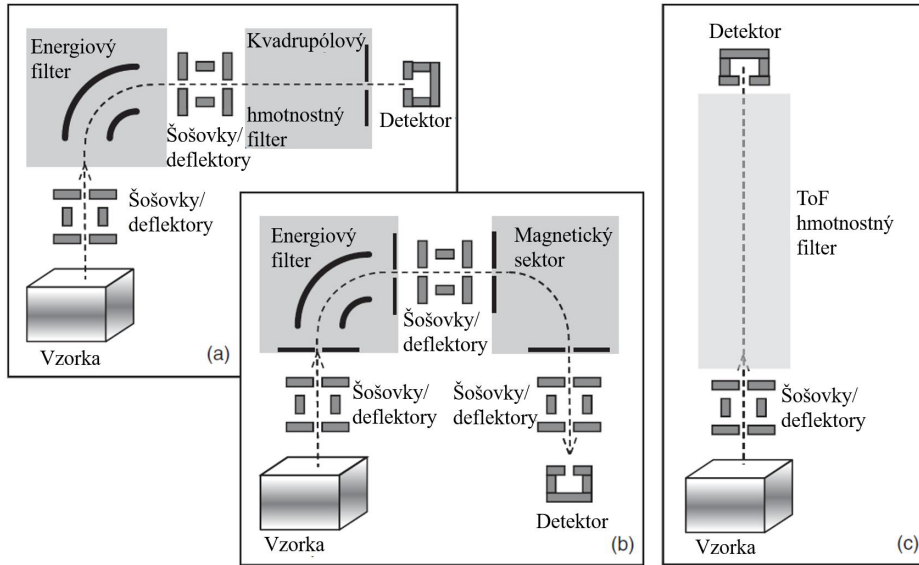
Kvadrupólový hmotnostný filter bol jeden z prvých filtrov použitých v zariadeniach SIMS. Tieto filtre sú vysoko efektívne pri analýze známych elementov vo vzorkách.

Konštrukčne sa tento filter skladá zo štyroch paralelných tyčí na ktoré je striedavo privedené kladné a záporné napätie, ktoré je ďalej modulované striedavým napätím. Riešením pohybových rovníc pre častice s pomerom m/q je možné dostať Mathieov diagram stability.

3.3.2. Magnetický sektor

Magnetické hmotnostné filtre sa vyskytovali v zariadeniach ešte pred vznikom metódy SIMS. Tieto filtre sa vyznačujú vysokými detekčnými limitmi, napríklad pre bórovú dopáciu v kremíku je rozlišovania schopnosť až do rádov $\sim 1 \times 10^{13}$ atómov/cm³. Tento filter je stále používaný tam kde je potrebná vysoká citlivosť, veľký dynamický rozsah a optimálne detekčné limity v dynamických podmienkach. Princíp je rovnaký ako pre filtre primárnych iónov využívajúcich magnetický sektor. Vychádzajú z faktu, že nabité častice sa v magnetickom poli pohybujú po špirále, ktorá sa za špecifických podmienok stáva kružnicou. Polomer tejto kružnice je daný pomerom m/q prelietajúcej častice podľa vzťahu 3.1.

3.4. IONTOF TOF-SIMS⁵



Obr. 3.6: Schematické rezy základných typov tubusov sekundárnych iónov, kvadrupólový filter (a), magnetický hmotnostný filter (b) a filter doby letu (c). Prevzaté a upravené z [20].

Tieto prístroje sa vyznačujú vysokou cenou a veľkými rozmermi, niekdy majú tieto filtre priemer až niekoľko metrov.

3.3.3. Filtre doby letu, ToF

Zariadenia s týmto typom hmotnostného filtra boli vyrobené krátko po uvedení zariadení s kvadrupólovými a magnetickými sektormi. V dnešnej dobe je to najrozšírenejší typ hmotnostného analyzátora v zariadeniach SIMS. Takéto prístroje sú vysoko efektívne v statickom režime a v dynamickom režime do malých analyzovaných hĺbok, s detekčnými limitmi v statickom móde až $\sim 1 \times 10^7$ atómov/cm³ pre železo na kremíku a $\sim 1 \times 10^{15}$ atómov/cm³ pre bór v kremíku v dynamickom režime. Ich najväšia výhoda je schopnosť zaznamenať veľké množstvo sekundárnych iónov s rôznymi pomermi m/q súčasne. Princíp činnosti takéhoto hmotnostného filtra sa zakladá na fakte, že väčšina sekundárnych iónov má energiu 1 – 10 eV, teda ak bude zaznamenaná doba potrebná na prekonanie vzdialenosti L , možno pre ne určiť pomer m/q . V komerčných zariadeniach sa sekundárne ióny urýchlia na konštantnú energiu v rozmedzí 2 – 8 keV a nechajú sa preletieť definovanej vzdialenosti jeden až dva metre. Z rovnice 3.2 pre kinetickú energiu po úprave vyplýva pre dobu letu vzťah:

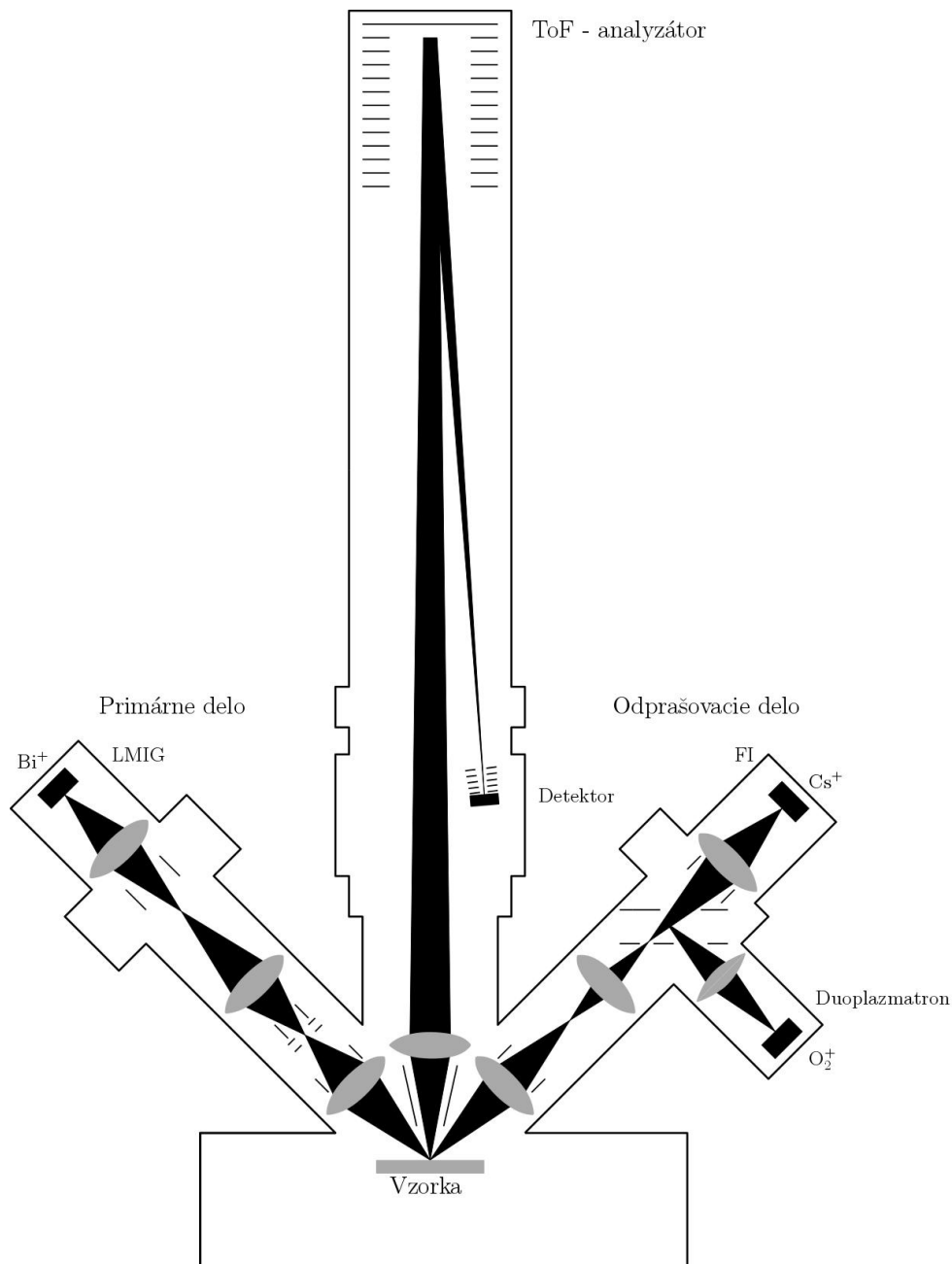
$$t = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2Vq}{m}} \quad (3.3)$$

kde L je dráha iónov a V urýchľovacie napätie. Tento systém umožňuje zaznamenanie veľkého množstva sekundárnych iónov súčasne, s tým že analyzované ióny sa volia až počas spracovania dát. Tento spôsob umožňuje spracovávať neznáme vzorky.

3.4. IONTOF ToF-SIMS⁵

Nami používaný prístroj je od spoločnosti IONTOF (Münster, Nemecko), konkrétne model ToF-SIMS⁵. Jedná sa o prístroj s analyzátorom sekundárnych iónov na báze filtra

doby letu s dĺžkou dráhy 2 m. Tento prístroj má ďalej dva primárne tubusy, jeden analyzačný a jeden odprašovací. Obidva sú umiestnené pod uhlom 45° ku kolmici k povrchu. Analyzačný zväzok je bizmutový, produkovaný zdrojom typu LMIG. Odprašovací zväzok je možné prepínať medzi dvoma druhmi a to kyslíkovým a céziovým, vznikajúcimi v Duoplazmatronovom a FI zdroji jednotlivo. Rez týmto zariadením je na obrázku 3.7.



Obr. 3.7: Schematický rez prístrojom IONTOF ToF-SIMS⁵.

4. Metódy tvorby rezov

V priemysle a výskume je často potrebné zobrazíť rez vytvorenou štruktúrou pre jej kontrolu a určenie parametrov. Preto vzniklo mnoho metód prípravy rezov. V základe sa tieto metódy dajú zdeliť do troch kategórií:

1. Mechanická tvorba rezov.
2. Chemická tvorba rezov.
3. Fyzikálna tvorba rezov.

Historicky prvá bola mechanická tvorba rezov v metalurgii pre pozorovanie vlastností vytvorených zliatín kovov pomocou optických mikroskopov. Postupne sa prechádzalo od optických mikroskopov k výkonnejším elektrónovým mikroskopom, SEM¹ a TEM². V prípade SEM ostáva príprava vzoriek rovnaká ako pre pozorovanie optickým mikroskopom. V prípade TEM je potrebné, aby bola skúmaná vzorka dostatočne tenká pre účinné presvietenie elektrónmi. Preto bolo nutné vyvinúť metódu prípravy vzorky, ktorou je možné dosiahnuť hrúbky vzorky do 100 nm. Prvou takouto metódou bolo chemické leptanie vzorky z podstatne hrubšieho kusu. Ako postúpila technológia časticovej optiky, do prípravy rezov sa pridala metóda FIB, rezanie vzoriek pomocou iónového odprašovania.

4.1. Mechanická tvorba rezov

Jedná sa o najstaršiu metódu tvorby rezov. Jedná sa o metódu pri ktorej sa vzorka opracováva mechanicky rezaním, brúsením a leštením štandardnými prípravkami. Táto metóda je pomerne časovo náročná. Táto časová náročnosť pramení z trvania jednotlivých krokov. Príprava vzoriek touto metódou sa delí na tieto kroky:

1. Rezanie vzorky zo skúmaného objektu, toto sa ďalej delí na:
 - lámanie
 - pílenie
2. Prichytávanie odrezanej vzorky do držiaka kompatibilného s použitými nástrojmi na brúsenie, leštenie, poprípade študovanie pomocou zvolenej metódy. V dnešnej dobe sa najčastejšie používa zalievanie do epoxidových živíc.
3. Brúsenie vybranej plochy vzorky do roviny.
4. Leštenie obrúsenej plochy pre minimalizáciu povrchových defektov spôsobených predchádzajúcimi krokmi.
5. Úprava rozmerov držiaka, epoxidového odliatku, pre montáž do meracieho zariadenia.

¹Skenovací elektrónový mikroskop, anglicky Scanning Electron microscope.

²Transmisný elektrónový mikroskop, anglicky: Transmission Electron Microscope.

4.1.1. Rezanie

Existujú prípady keď je vzorka požadovaných rozmerov, ale väčšinou je potrebné odstránenie istého množstva materiálu. Pre študovanie objemových prvkov vzorky je tento krok nevyhnutný. K rezaniu sa dá použiť množstvo mechanických procesov, ale bez rozdielu na zvolenej metóde, je potrebné aby pri rezaní nedošlo k poškodeniu vnútornej objemovej štruktúry. Toto poškodenie je najčastejšie tepelného charakteru a je zapríčinené teplom generovaným pri rezaní. K istému stupňu poškodenia na rezanej ploche dochádza vo väčšine prípadov rezania [24].

Lámanie

Niektoré študované materiály sú príliš tvrdé pre pílenie, poprípade príliš krehké (napríklad keramické materiály), alebo pílením sa riskuje poškodenie vnútornej štruktúry vzniknutým teplom (najčastejšie martenzitické ocele). Preto sa pre takéto materiály často používa lámanie.

Lámanie je rýchla, jednoduchá a efektívna metóda odstraňovania prebytočného materiálu. Po lome je následne nutné vyhladiť vzniknutú plochu brúsením a leštením.

Táto technika je často používaná pre tvorbu vzoriek v polovodičovom výskume. Pre presnejšiu lomovú líniu sa kremíková doska naškrabne diamantovým hrotom na hrane dosky pre zavedenie defektov do kryštalickej mriežky, čo vytvorí preferenčnú lomovú líniu kremíkovej dosky pozdĺž týchto defektov [24].

Pílenie

Pílenie je najuniverzálnejšia metóda tvorby rezov vzoriek, dá sa rozdeliť podľa typu a tvaru rezného nástroja na:

1. Kotúčové pílenie: Jedná sa o tenký rotujúci disk pokrytý zrnami brusiva vo fixačnom materiáli, postupne obrusuje zo vzorky v mieste styku. Väčšinou sa jedná o diamantové alebo karbidové zrno. Druhou možnosťou je klasický disk so zubami na hrane z materiálu tvrdšieho ako je rezaný materiál.
2. Listové pílenie: V princípe je rovnaké ako kotúčové pílenie, ale namiesto kotúča sa jedná o tenký nekonečný list preťahovaný materiálom.
3. Drôtové pílenie: Tento proces sa s výhodou používa pri rezaní kremíkových dosiek z monokryštalickeho bloku. Jedná sa o proces v ktorom je napnutý nekonečný drôt ťahaný sústavou kladiek cez rezaný materiál. Táto metóda sa ďalej delí na dva druhy:
 - V prvom prípade je preťahovaný drôt pokrytý abrazívnym materiálom permanentne, väčšinou sú abrazívne zrná pritavené k povrchu drôtu.
 - Brusivo je voľné, vmiešané do chladiacej kvapaliny, ktorá je vpravovaná do rezu, kde je brusivo strhávané pohybujúcim sa drôtom.

Počas pílenia dochádza k tvore veľkého množstva tepla v oblasti styku rezného a rezaného materiálu, preto je nutné výkonné chladenie a mazanie tejto plochy. Ďalším spôsobom minimalizovania vzniknutého tepla je pomalootáčkové rezanie. Tieto dva aspekty sa používajú spoločne pre dosiahnutie najlepších výsledkov.

V polovodičovom priemysle sa často používajú kotúčové píly s diamantovým prachom pre rezanie kremíkových dosiek na jednotlivé čipy. A píly všetkého druhu pri analýze porúch zariadení [24].

4.1.2. Prichytenie vzorky

Spôsob prichytenia vzorky je udávaný objektom pozorovania na vzorke. Vo väčšine prípadov sa jedná o povrchovú štruktúru. V takomto prípade sa vzorky prichytávajú pomocou rôznych lepidiel, v závislosti na prostredí v ktorom budú analyzované. Poprípade, ak má toto prostredie vysoké nároky na čistotu, napríklad UHV v niektorých zariadeniach, sa namiesto lepidiel používajú svorky z adekvátnych materiálov. Použité materiály závisia na podmienkach merania, teplotách, ktorým budú vystavené a možnej kontaminácii vzorky nežiadúcimi materiálmi.

Ďalšou skupinou študovaných predmetov sú objemové prvky vo vzorke, môže sa napríklad jednať o kryštalickú štruktúru meniacu sa s hĺbkou pod povrchom (kalené ocele), alebo napríklad dopované štruktúry v polovodičovom priemysle. V takýchto prípadoch je hrúbka vzorky podstatne menšia ako jej plocha a je nutné ju prichytiť, tak aby sa zväčšila plocha rezu vzorky. V polovodičovom priemysle sa najviac používa zaliatie vzorky do plastických hmôt. V tomto postupe je dôležité, aby použitá hmota mala podobnú tvrdosť ako skúmaná vzorka, poprípade podobnú odolnosť voči oderu. Toto je dôležité pri následnom brúsení a leštení. Lebo z menej odolného materiálu bude odoberané rýchlejšie, čo spôsobí deformáciu skúmaného povrchu vzorky. Tvrdosti často používaných materiálov sú zhrnuté v tabuľke 4.1.

Tabuľka 4.1: Tabuľka tvrdosti najčastejšie používaných materiálov pre zalievanie vzoriek. Dáta sú uvedené v Rockwellovej M-stupnici. Každá skupina materiálov obsahuje množstvo rôznych variant, uvedené hodnoty tvoria rozmedzie pre danú skupinu materiálov.

Materiál	Tvrdosť, HRM
Teplom tvrdnúce živice	
Fenolové	118 ~ 109
Dialyl-ftalátové	106 ~ 99
Epoxidy	109 ~ 89
Termoplastické živice	
Polymetyl-metakrylát	~ 91
Odlievateľné živice	
Akryláty	35 ~ 56
Polyestery	60 ~ 89
Epoxidy	27 ~ 72
Vodivé materiály	
Meďou plnené dialyl-ftaláty	~ 89
Hliníkom plnené fenoly	~ 44

4.1.3. Brúsenie

Brúsenie je dôležitý krok v príprave rezov vzoriek, jeho cieľom je odstránenie vrstvy deformovanej procesom rezania, poprípade vrstvy pozmenenej teplom vzniknutým pri rezaní. Počas brúsenia dochádza taktiež k poškodeniu povrchu vzorky, toto poškodenie musí byť dostatočne malé, aby bolo odstránené ďalším brúsením na jemnejšom brusive.

Najčastejšie sa vzorky brúsia radou brúsnych papierov s postupne sa zmenšujúcou hrúbkou. Najpoužívanejšia rada je 60, 120, 240, 320, 400 a 600. Prvotná hrúbka je určená použitou metódou rezania.

Pre minimalizáciu teplom indukovaného poškodenia vzorky a použitého brúsneho papiera sa používa mokré brúsenie. Mokré brúsenie minimalizuje množstvo materiálu zachy-

távaného v brúsnom papieri, čím znižuje trenie a zvyšuje efektivitu procesu. Taktiež slúži pre chladenie brúsenej vzorky, čím sa ďalej minimalizuje tepelné poškodenie, najčastejšou chladiacou kvapalinou býva voda. Chladiaca kvapalina tiež odstraňuje oddelené brusivo, čím minimalizuje možnosť vtlačenia tohto odpadného materiálu do výbrusu. Často používané brusivá sú: oxid hlinitý (korund) Al_2O_3 a karbid kremíka SiC. Tieto materiály majú podobnú tvrdosť 9.5 Mohs pre SiC a 9.1 Mohs pre Al_2O_3 . Ich hlavná odlišnosť je v tvare zrna, SiC zrná sú ihlicovitého tvaru, čo spôsobuje vtlačanie voľných kúskov brusiva do mäkkých materiálov.

Väčšina výbrusov sa robí na rovinnej brúske. Tento stroj sa skladá z rovinného rotujúceho disku na ktorý je z vrchnej strany prichytený brúsny papier. Tento je následne zmáčaný prúdom vody. Táto je odstredivými silami rozprestieraná po kotúči. Na tento kotúč sa potom pritláčajú vzorky v držiakoch buď ručne, alebo roboticky. Orientácia vzorky voči smeru rotácie brúsneho kotúča sa počas procesu musí meniť, tým sa zaistí maximálne odstránenie škrabancov z predchádzajúceho kroku [24].

4.1.4. Leštenie

Posledným krokom v príprave vzoriek pred meraním býva leštenie. Princíp leštenia je podobný ako pri brúsení, jediný rozdiel je v tom, že brusivo je voľne plávajúce v chladiacej kvapaline. Pri leštení sa zväčša používa diamantové brusivo s veľkosťami zrna $30 \sim 3 \mu\text{m}$ pre hrubé leštenie a zrno pod $1 \mu\text{m}$ pre jemné leštenie, veľmi malé zrná, pod $0.5 \mu\text{m}$ sú z Al_2O_3 . Orientácia vzorky voči smeru rotácie sa musí v priebehu leštenia meniť, tak ako pri brúsení. V niektorých prípadoch sa voda mení za oleje, poprípade sa do vody pridáva mydlo, pre zlepšenie mazacích schopností, toto ale pri použití Al_2O_3 spôsobuje spomalenie procesu [24].

4.2. Chemická tvorba rezov

Potreba tenkých rezov pre analýzu pomocou TEM dala vzniknúť ďalším metódam tvorby rezov. Prvou bola chemická tvorba tenkých rezov, takzvaných lamíel. V tejto metóde bola na vzorku kvapnutá kyselina, následne sa čakalo kým kyselina preleptala vzorku a odkvapla. Na hrane takto vzniknutého otvoru bola hrúbka zostávajúceho materiálu len niekoľko nm. Táto metóda je ale pomerne nepresná, je nemožné dopredu definovať kde na vzorke vznikne dostatočne tenká hrana pre pozorovanie v TEM.

Ďalšími možnými chemickými prípravami rezov je aplikácia špeciálnych leptadiel na dopredu pripravený povrch rezu (vyleštený rez vzorky) pre zvýraznenie chemického zloženia objemu vzorky. Existujú napríklad leptadlá, ktoré selektívne leptajú rôzne kryštalické orientácie, alebo rôzne dopovaný kremík. Použitím týchto prípravkov je možné pozorovať inak nepozorovateľné P-N prechody v integrovaných obvodoch alebo kryštalické defekty v substráte [25].

4.3. Fyzikálna tvorba rezov

Fyzikálna tvorba rezov je proces pri ktorom je vzorka opracovávaná pomocou fokusovaného iónového zväzku, FIB³. Táto metóda opracovávania je najmladšia z metód tvorby vzoriek, vyvíjala sa spolu s vývojom iónovej optiky. Najčastejšie použitie tejto metódy

³Fokusovaný iónový zväzok.

4.4. MERANIE TIGBT ŠTRUKTÚR

je pre výrobu lamíel pozorovaných v TEM a pre prípravu rezov študovaných v SEM⁴. Konštrukcia tubusov je podobná primárnym tubusom v prístrojoch SIMS, jediný rozdiel je, že tubusy pre opracovávanie vzoriek prednostne generujú DC zväzok, nie pulzný, pre zrýchlenie opracovávania. Tieto tubusy používajú ako zdroj LMIG pre jeho malú stopu a vysoký jas.

Väčšinou sa tieto rezy pripravujú v zariadeniach FIB-SEM, jedná sa o kombinované zariadenia, kde v hlavnej komore je pripojený ako elektrónový tubus SEM prístroja, tak FIB tubus. Časté usporiadanie je elektrónový tubus umiestnený kolmo k vzorke a FIB tubus umiestnený pod uhlom [27]. Dôležitým prvkom v takomto prístroji je schopnosť nakloniť vzorku aby os FIB tubusu bola kolmá na povrch vzorky.

Fyzikálny proces rezania je založený na princípe odprašovania materiálu dopadom energetických iónov, podobne ako pri generácii signálu v SIMS. Ak je študovaná štruktúra pri povrchu vzorky, nanáša sa ešte na povrch ochranná kovová vrstva na ponechanú hranu. Táto plocha tejto vrstvy sa minimalizuje na oblasť tesne pri reze. Toto má dva dôvody, po prvé sa šetrí časom pri výrobe tejto vrstvy, táto vrstva je v samotnej analýze nepodstatná a po druhé je šetrí sa časom rezania, toto je výhodné pre limitovanú životnosť iónového zdroja.

Tak ako pri mechanickej tvorbe rezov aj pri FIB sa najprv reže a následne zaleštuje. V prípade FIB to znamená, že pre rezanie sa používa zväzok s vysokým prúdom, pre vyššiu rýchlosť odberu materiálu. Vzniknutá plocha sa v zahladzuje zväzkom s malým prúdom. Výhodou oproti mechanickej lešteniu je, že na oba kroky sa použije jeden prístroj a rovnaké ióny, len so zmenenými parametrami. Zahladzovanie sa robí v rovnakej polohe vzorky ako rezanie [28] a [29].

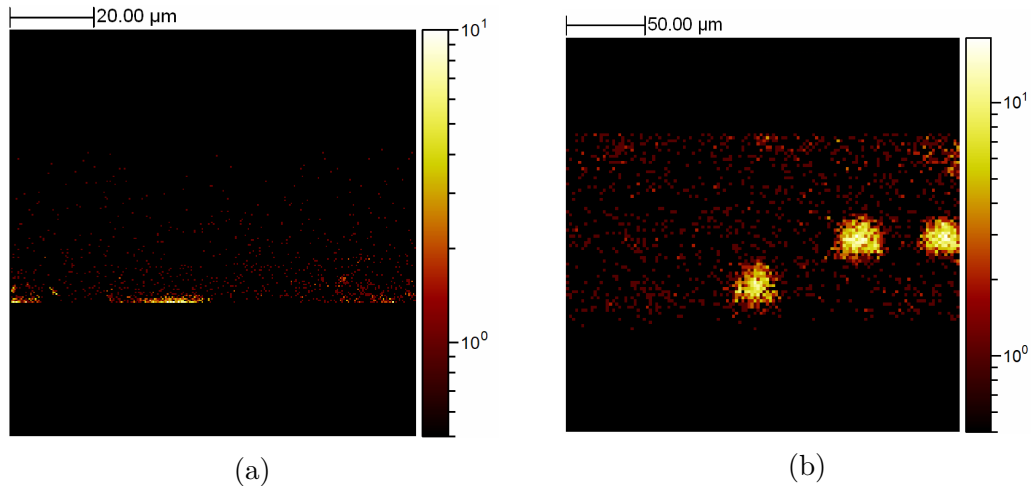
4.4. Meranie TIGBT štruktúr

Pre vzorky TIGBT tranzistorov boli v minulosti skúmané morfológie deponovaných AlSi-AlCu vrstiev, ktoré boli študované v autorovej bakalárskej práci [4]. Táto práca bola zameraná na štúdium okrajových ukončovacích štruktúr. Štúdium okrajových ukončovacích štruktúr metódou SIMS v štandardne používanom usporiadaní je skoro nemožné. Jedná sa o slabo dopované štruktúry pomerne malých rozmerov (rádovo $\approx 10^1 \mu\text{m}$) a v štandardnom usporiadaní SIMS sú ale rozmerové nepresnosti v rádoch jednotiek mikrometrov. My sme sa pokúsili o meranie týchto štruktúr po prerezaní vzorky kolmo k povrchu a štruktúram tak, aby na výslednej ploche boli všetky skúmané tvary súčasne.

Pripravených bolo viacero vzoriek, s cieľom nájsť vhodné parametre pre zobrazenie P dopovaných okrajových ukončovacích štruktúr.

Prvé vzorky boli len lomy z kremíkovej dosky upevnené na zostrojenom držiaku. Tieto vzorky sa neosvedčili, pretože ich hrana bola príliš deformovaná. Toto bolo spôsobené hrúbkou kremíkovej dosky, ktorá bola $t = 100 \mu\text{m}$. Kvôli malej hrúbke dochádza k deformácii lomovej línie. Táto deformácia spôsobuje zakrivenie elektrického poľa nad vzorkou, čo spôsobuje následné zníženie signálu a jeho deformáciu. Získaný signál bóru je na obrázku 4.1a. Obrázok 4.1a znázorňuje sčítaný signál z hĺbkového profilu, pre jeho maximalizáciu. Samotný signál je iba na hornej hrane vzorky.

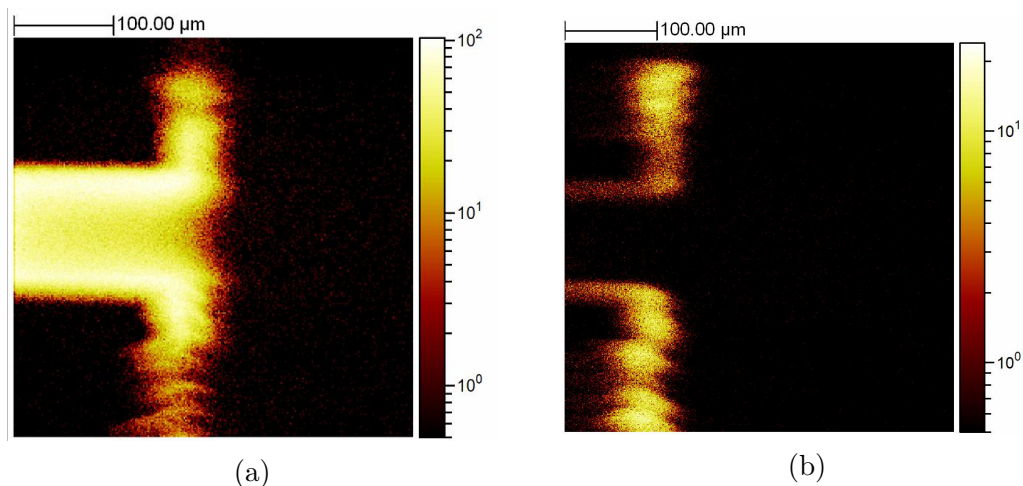
⁴Skenovací elektrónový mikroskop, pre viac informácií [26].



Obr. 4.1: Sčítané signály profilovania bóru vo vzorkách TIGBT, na lámanej hrane (a) a na rezanej hrane (b).

Daľšia vzorka bola pripravená rezaním diamantovým kotúčom používaným na rezanie čipov z dosiek. Touto pílou bola vyrezaná vzorka z kremíkovej dosky. Táto bola upevnená na zostrojený držiak a naklonená na hranu. Podobne ako pre lámané vzorky, aj tu dochádzalo k zakrivovaniu elektrického poľa a degradácii signálu. Po úprave hrany odprašovaním bolo možné zmerať signál bóru tesne nad hranicou pozadia. Výsledok je na obrázku 4.1b. V tomto signále bóru sa už javia tvary pripomínajúce prstenec okrajovej ukončovacej štruktúry.

Následný pokus bol zabrúsiť a vyleštiť hranu pod malým uhlom. Toto bolo robené na zariadení Tegramin 30 od spoločnosti Struers⁵. Pre prvotné zabrúsenie hrany pod uhlom 5° bol použitý SiC brúsny papier zrnitosti 1200⁶. Následne bola vzniknutá hrana zaleštená na plstenom disku s použitím suspenzie obsahujúcej diamantové brusivo hrúbky $3\text{ }\mu\text{m}$ ⁷. Týmto procesom bol dosiahnutý povrch dostatočnej kvality pre analýzu v SIMS. Výsledky analýzy vzniknutej hrany sú na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Sčítané signály profilovania bóru profilované na zabrúsenej hrane, pre nestabilitu LMIG zdroja boli robené dve merania, prvá časť (a), druhá časť (b).

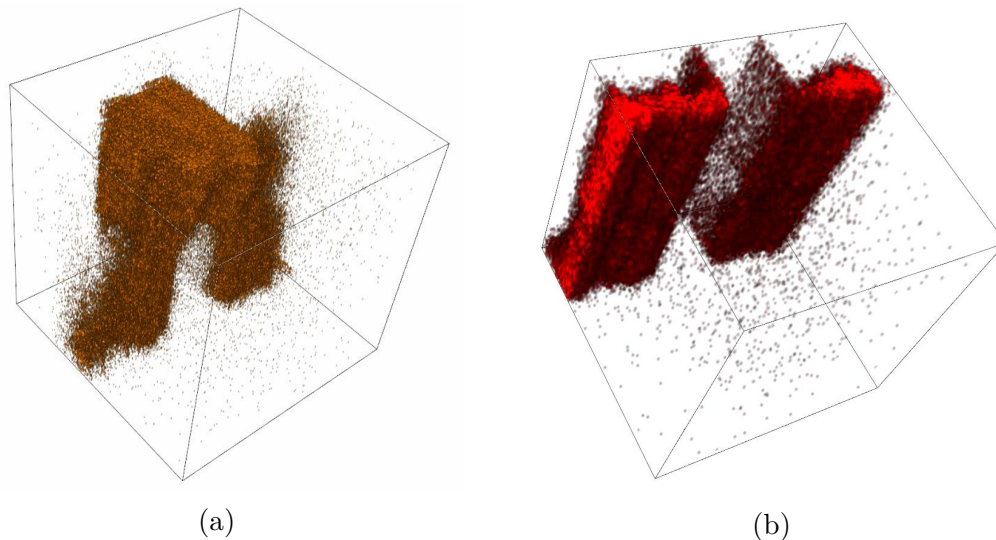
⁵Pre viacej informácii [30].

⁶Od Struers, [31]

⁷Použitý disk a pasta [32] a [33]

4.4. MERANIE TIGBT ŠTRUKTÚR

Na začiatku profilovania (obrázok 4.2a) bola v strede výrazná dopovaná oblasť, ktorá sa postupne posunula mimo pozorovanú oblasť. Toto je spôsobené zbrúsením pod uhlom voči štruktúram, tento efekt bol očakávaný. Po obidvoch stranách dopovanej oblasti sa nachádzali kruhové štruktúry (obrázok 4.2b). Tieto predstavujú plávajúce prstence okrajovej ukončovacej štruktúry. Pre lepší pohľad sú vytvorené 3D hĺbkové profily týchto meraní na obrázku 4.3. V oblasti nad týmito štruktúrami sa nachádza pasivačná vrstva z bór-fosfor-silikátového skla.



Obr. 4.3: 3D hĺbkové profily bóru profilované na zabrúsenej hrane, pre nestabilitu LMIG zdroja boli robené dve merania: prvá časť (a), druhá časť (b).

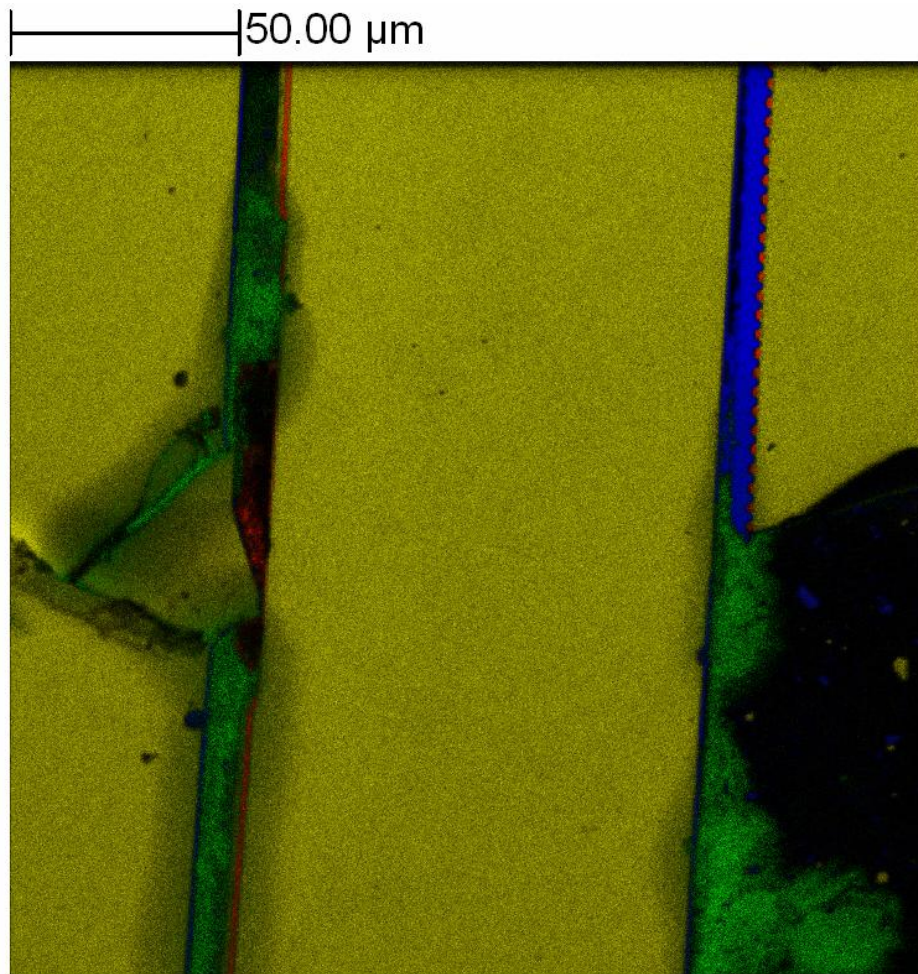
Posledným experimentom bolo zaliatie rezaných čipov do vodivého akrylátového termostoplastu, zabrúsenie a vyleštenie plochy rezu. Zalievanie bolo robené na prístroji Citopress-15 od spoločnosti Struers. Použitý akrylát bol tiež od spoločnosti Struers, konkrétne Condu-Fast. Tento akrylát má prímes kovového prachu pre zaistenie elektrickej vodivosti, vhodnej pre analýzu v SIMS. Následné brúsenie a leštenie bolo robené na prístroji Tegramin 30. Použitá postupnosť brusív bola SiC brusivá o zrnitostiach 120, 1200 a 4000⁸. A následné leštenie diamantovými suspenziami s veľkosťami zŕn 3 μm a 250 nm⁹.

Výsledkom bola hladká plocha. Počas procesu zalievania došlo k tlakovej deformácii pripravovaných vzoriek, výsledkom čoho bola vysoká koncentrácia prasklín.

Výsledný profil je na obrázku 4.4. Tento obrázok znázorňuje rozloženie významných iónov v meranej oblasti. Bór (červená) je na pravej vzorke detekovaný v oblasti pod hliníkovou metalizačnou vrstvou (zelená) trenchov, kde sa nachádzajú P-dopované oblasti. Hlavná študovaná oblasť sa ale nachádza na prostrednej vzorke. Tu by sa pod tenkou bórovou vrstvou (červená), znázorňujúcou pasivačnú sklenenú vrstvu mali nachádzať P-prstence okrajovej ukončovacej štruktúry.

⁸Použité kotúče [31]

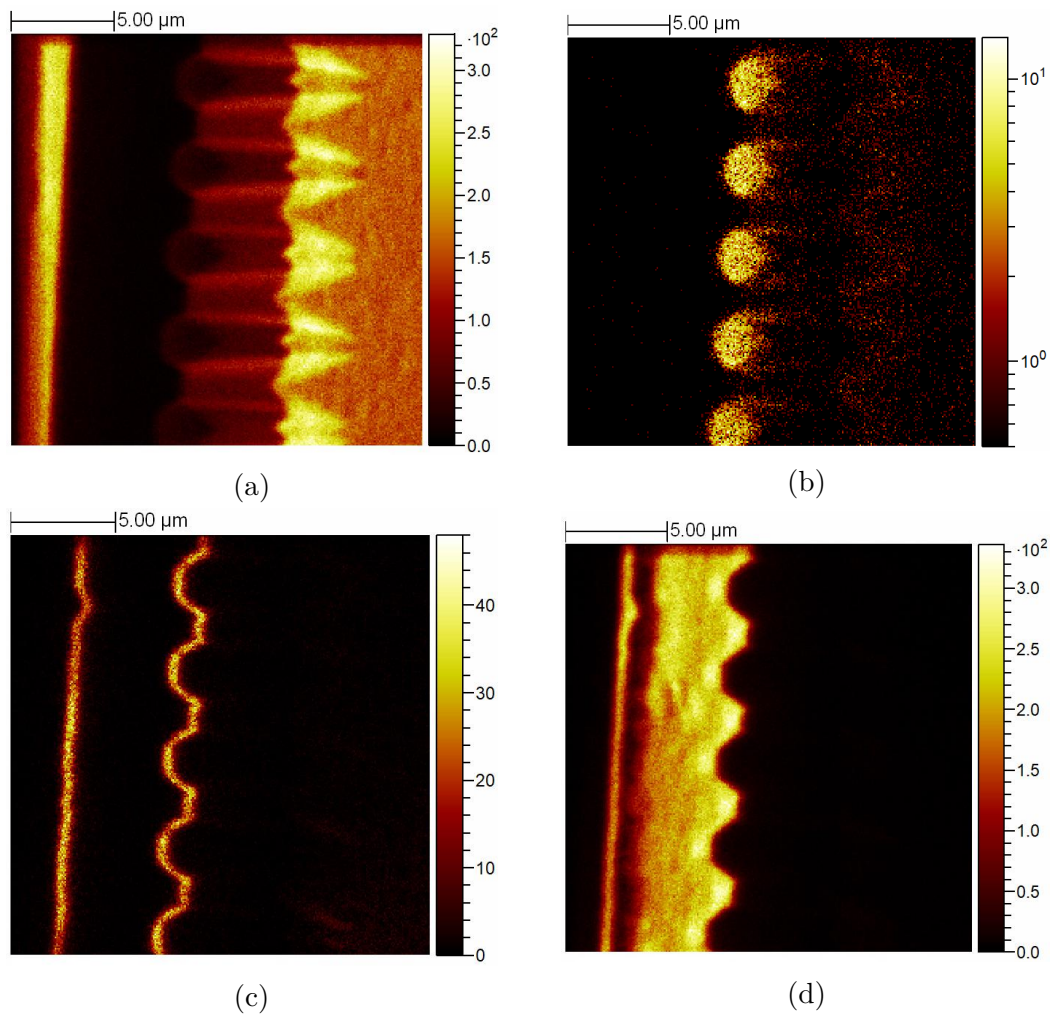
⁹Použité pasty [33] a povrchy [32].



Obr. 4.4: Profil iónov kremíka (žltá), hliníka (modrá), bóru (červená) a uhlíka (zelená) meraný na zalievanej vzorke.

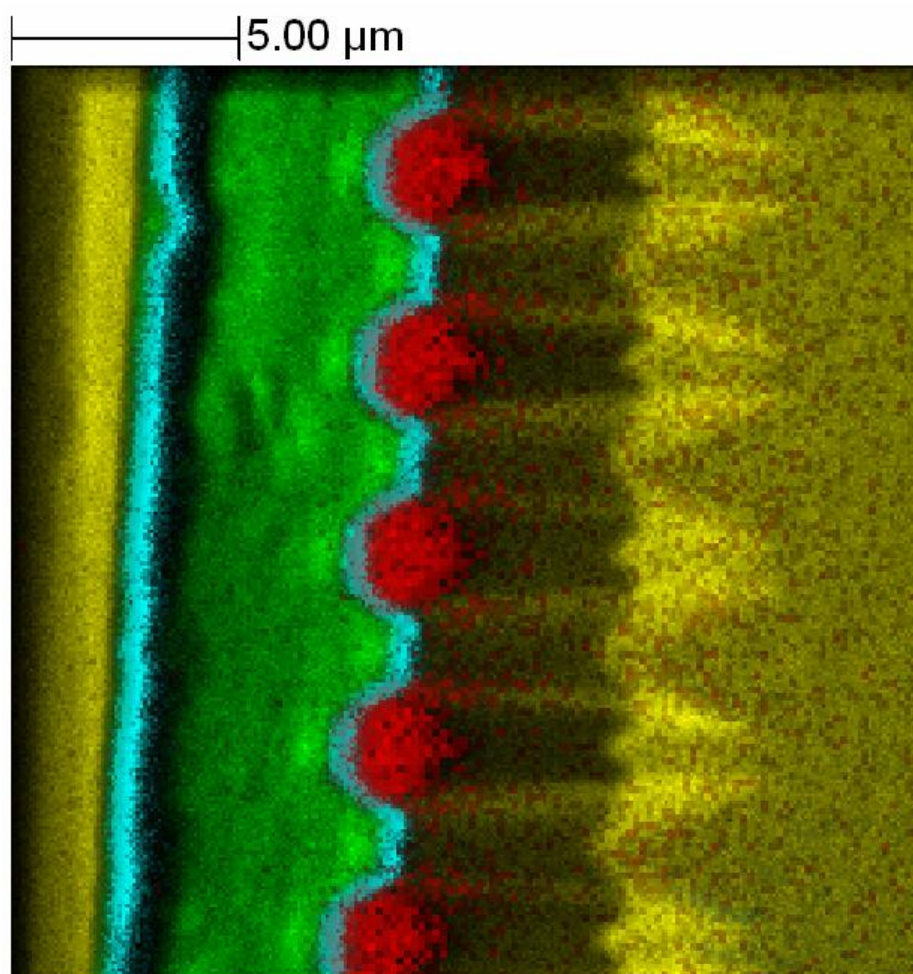
Pre určenie rozlišovacej schopnosti prístroja bola zobrazená oblasť trenchov na tejto vzorke. Vybraná oblasť bola v pravej hornej časti v obrázku 4.4. Profilovanie bolo robené v zobrazovacom móde s odprašovaním pomocou O_2^+ iónov s energiou $E_k(\text{O}_2^+) = 500 \text{ eV}$. Parametre merania boli: energia $E_k(\text{Bi}^+) = 30 \text{ keV}$, analyzovaná oblasť $(20 \times 20) \mu\text{m}$, odprašovaná oblasť $(500 \times 500) \mu\text{m}$. Výsledné profily sú a obrázku 4.5 a preložený profil je na obrázku 4.6.

4.4. MERANIE TIGBT ŠTRUKTÚR



Obr. 4.5: Jednotlivé signály kremíka (a), bóru (b), titánu (c) a hliníka (d)

Z profilu titánu (obrázok 4.5c) bola určená rozlišovacia schopnosť prístroja na hodnotu ≈ 330 nm s minimálnou zaznamenanou hodnotou 258 nm v tomto profile. Tieto hodnoty boli stanovené ako rozdiel 16 % a 84 % minimálneho a maximálneho signálu.



Obr. 4.6: Preložené profily kremíka (žltá), bóru (červená), titánu (azúrová) a hliníka (zelená).

5. Meranie tenkých vrstiev

Pre optimalizáciu prístroja ToF-SIMS⁵ pre meranie polovodičových súčiastok. A pre osvojenie ovládania prístroja. Boli robené merania na tenkých periodických štruktúrach Röntgenového zrkadla a indiových multyvrstvách v GaN substráte. Tieto merania boli zamerané na optimalizáciu hĺbkového rozlíšenia na periodickej štruktúre tenkých vrstiev a optimalizáciu detekčných limitov v takýchto meraniach.

5.1. Testovanie parametrov primárneho zväzku na Röntgenovom zrkadle

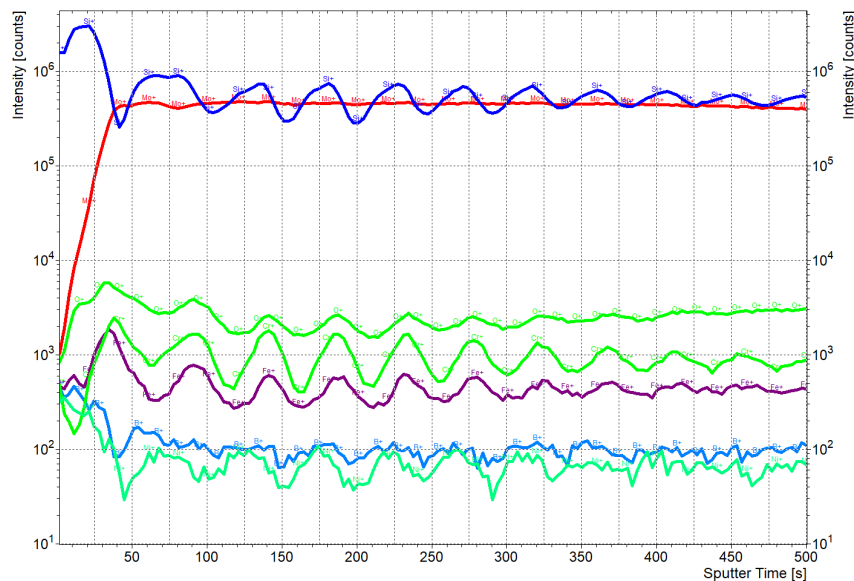
Okrem referenčných meraní, bolo nutné určiť vplyv rôznych parametrov primárneho iónového zväzku na výsledky hĺbkovej analýzy. Menili sme energiu primárneho iónového zväzku, druh primárnych iónov, rozmery analyzovanej oblasti a rýchlosť odprašovania.

Vzorka Röntgenového zrkadla sa skladala z periodických vrstiev kremíka (Si) a molybdénu (Mo). Na takýchto vrstvách je možné pozorovať nežiadúce efekty odprašovania materiálu pri metóde SIMS. Najvýraznejším býva premiešavanie materiálov pri dopade iónových zväzkov, čo má za následok rozmazávanie prechodov medzi vrstvami vo vzorke. Tento efekt sa najvýraznejšie prejavuje práve na periodicky opakujúcich sa štruktúrach, kde dochádza k postupnému vyhladzovaniu signálu, čo v extrémnych prípadoch vedie k strate hĺbkovej informácie o zložení vzorky.

Použitá vzorka vrstiev bola, vyrobená na 400 μm hrubej kremíkovej doske. Nanesená štruktúra sa skladala z kremíkovej a molybdénovej periodicky sa opakujúcej dvojvrstvy. Každá dvojvrstva mala hrúbku 7 nm a jednotlivé vrstvy boli hrubé 3.5 nm. Celkový počet nanosených dvojvrstiev bol 60, s výslednou hrúbkou 420 nm. Tieto údaje pochádzajú z predchádzajúcich meraní na týchto vrstvách [34]. Hrúbka vrstiev bola určená pomocou transmisného elektrónového mikroskopu JEM-2000EX od spoločnosti Jeol a pomocou Röntgenovej difrakcie pod malými uhlami (SAXRD) zariadením D8 Discover.

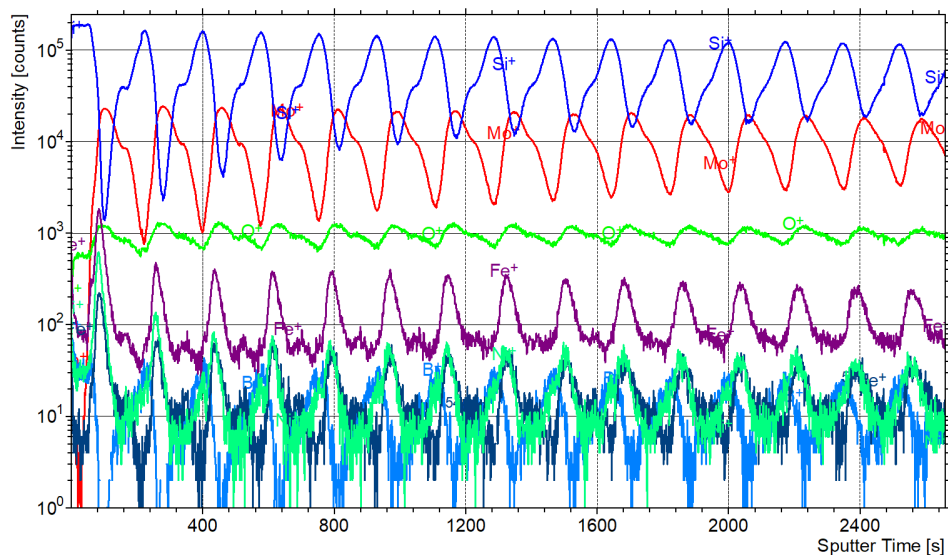
Pre odprašovanie bol použitý kyslíkový zväzok o energii 500 eV a prúde $I_{\text{DC}} = 110 \text{ nA}$.

Prvé meranie bolo merané s energiou primárneho zväzku 30 keV iónmi Bi_1^+ , s analyzovanou oblasťou rozmerov $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$. Výsledný hĺbkový profil je uvedený na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Hĺbkový profil Röntgenového zrkadla profilovaný $E(\text{Bi}_1^+) = 30 \text{ keV}$; analyzovaná oblasť $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$; odprašovací zväzok: O_2^+ o energii $E_k = 500 \text{ eV}$; odprašovaná oblasť $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$. Profil je nekalibrovaný, na osi x je čas odprašovania odprašovacím zväzkom a na osi y je meraná intenzita signálov.

Na hĺbkovom profile možno pozorovať postupné premiešavanie vrstiev, čo znázorňuje postupné vyhladzovanie signálov všetkých analyzovaných prvkov. V hmotnostnom spektre okrem hlavných prvkov Mo a Si boli pozorované ešte intenzívne signály železa, niklu a chrómu. Prítomnosť týchto prvkov bola overená pomocou ich izotopov, ktoré kopírovali hĺbkový profil hlavných izotopov.



Obr. 5.2: Hĺbkový profil druhého merania Röntgenového zrkadla so zníženou energiou primárnych iónov a zväčšenou analyzačnou plochou: $E(\text{Bi}_1^+) = 15 \text{ keV}$; analyzovaná oblasť $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$; odprašovací zväzok: O_2^+ o energii $E_k = 500 \text{ eV}$; odprašovaná oblasť $(300 \times 300) \mu\text{m}^2$. Profil je nekalibrovaný, na osi x je čas odprašovania odprašovacím zväzkom a na osi y je meraná intenzita signálov.

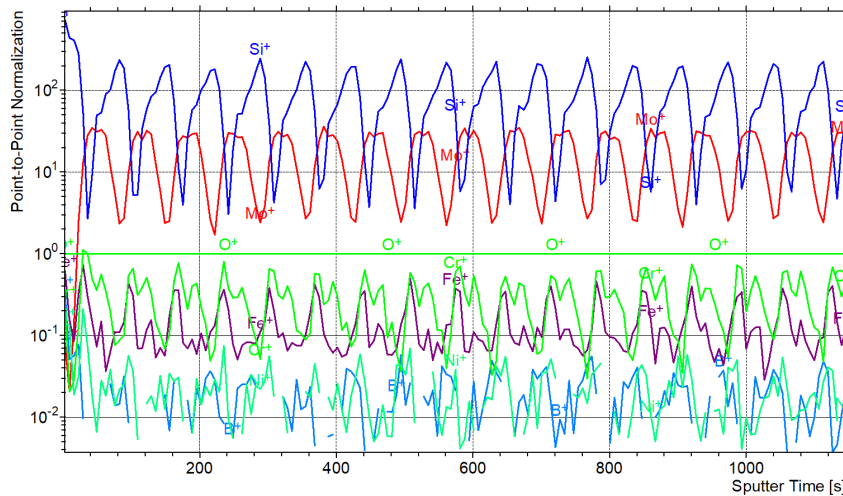
5.1. TESTOVANIE PARAMETROV PRIMÁRNEHO ZVÄZKU NA RÖNTGENOVOM ZRKADLE

Pre zníženie efektu premiešavania vrstiev postupným odprašovaním bizmutovým zväzkom bola energia Bi zväzku znížená na 15 keV. Prvé meranie so zníženou energiou bolo robené v oblasti $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$ pre určenie plošnej homogenity vrstiev.

Hĺbkový profil tohto merania je uvedený na obrázku 5.2. Pri porovnaní s prvým profilom na obrázku 5.1 je efekt premiešavania jednotlivých vrstiev podstatne nižší. V hĺbkovom profile sú viditeľné jednotlivé vrstvy Mo. Čo v prípade použitia 30 keV primárneho zväzku nebolo možné. Slabý efekt premiešavania je ešte viditeľný v hlbších vrstvách zo znižujúcej sa amplitúdy intenzít pre jednotlivé prvky.

Okrem prvkov Mo a Si boli pozorované aj prvky Fe a Cr (obrázok 5.2). Signály prvkov Si, Mo, Fe a Cr boli rekonštruované do 3D hĺbkového profilu pre lepšiu vizualizáciu polôh prvkov Fe a Cr voči prvkom Si a Mo. Z hĺbkového profilu (obrázok 5.2) je zjavné, že vrstvy kovov Fe a Cr sa vyskytujú výhradne na prechode medzi vrstvami Si a Mo. Z tohto faktu možno usúdiť že k primiešaniu týchto materiálov do nanášaných vrstiev došlo pri prerušení depozície. Čo sa robí pomocou clony, ktorá odcloní prúd nanášaných atómov. Z tohto poznatku možno usúdiť, že počas procesu odclonenia iónov došlo k nechcenému odprašovaniu povrchu clony, čo malo za následok depozíciu istého množstva prvkov obsiahnutých v nehrdzavejúcej oceli na vzorku. Čo potvrdzuje aj fakt, že signály Fe a Cr sa prekrývajú, to znamená, že došlo k ich nanášaniu v rovnakom čase.

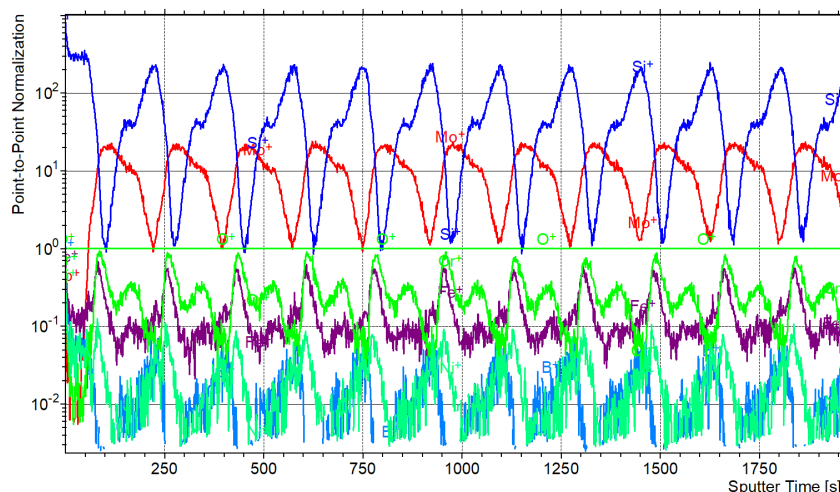
Pri ďalšom meraní bol do komory napúšťaný kyslík na tlak 1×10^{-5} mBar. Takáto atmosféra pôsobí podobne ako použitie kyslíkového odprašovacieho zväzku, zvyšuje intenzitu generovaných pozitívnych iónov. Skúmaná oblasť bola zmenšená pre urýchlenie analýzy na plochu $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$ z odprašovanej oblasti $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$. Výsledný hĺbkový profil je na obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Hĺbkový profil Röntgenového zrkadla: $E(\text{Bi}_1^+) = 15 \text{ keV}$; analyzovaná oblasť $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$; odprašovací zväzok: O_2^+ o energii $E_k = 500 \text{ eV}$; odprašovaná oblasť $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$; atmosféra O_2 ; tlak $p(\text{O}_2) = 1 \times 10^{-5} \text{ mBar}$. Signály sú normalizované na signál O^+ .

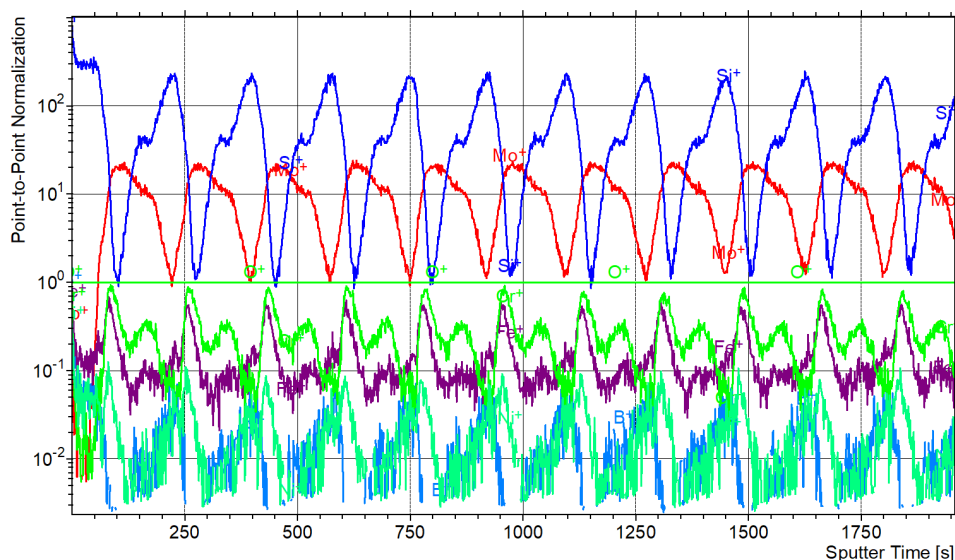
Výsledné spektrum má pomerne vysoký šum, čo sa prejavuje rozdielnymi polohy maxím a miním jednotlivých vrstiev a tvarom samotného spektra.

Pred ďalším meraním bol upravený tvar stopy primárneho zväzku s ponechanými parametrami merania. Analyzovaná oblasť bola $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$ a odprašovaná oblasť bola $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$.



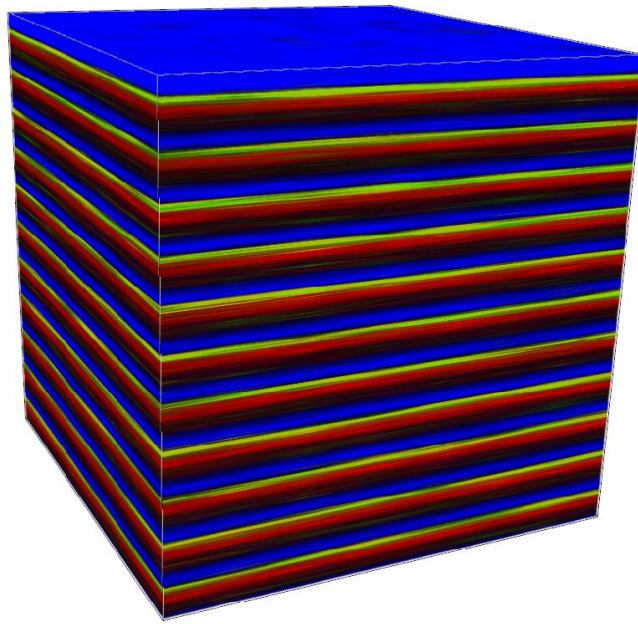
Obr. 5.4: Hĺbkový profil Röntgenového zrkadla s upraveným tvarom stopy primárneho zväzku: $E(\text{Bi}_1^+) = 15 \text{ keV}$; analyzovaná oblasť $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$; odprašovaná oblasť $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$; atmosféra O_2 ; tlak $p(\text{O}_2) = 1 \times 10^{-5} \text{ mBar}$. Signály sú normalizované na signál O^+ .

Na obrázku 5.4 je výsledný hĺbkový profil Röntgenového zrkadla meraný s upraveným tvarom stopy primárneho zväzku a ponechanými parametrami merania. Výsledný hĺbkový profil obsahuje viac detailov a má nižšiu úroveň šumu ako pri meraní s neoptimalizovanou stopou primárneho zväzku (obrázok 5.3). Amplitúdy spektier jednotlivých vrstiev sa po dobu merania menia minimálne.



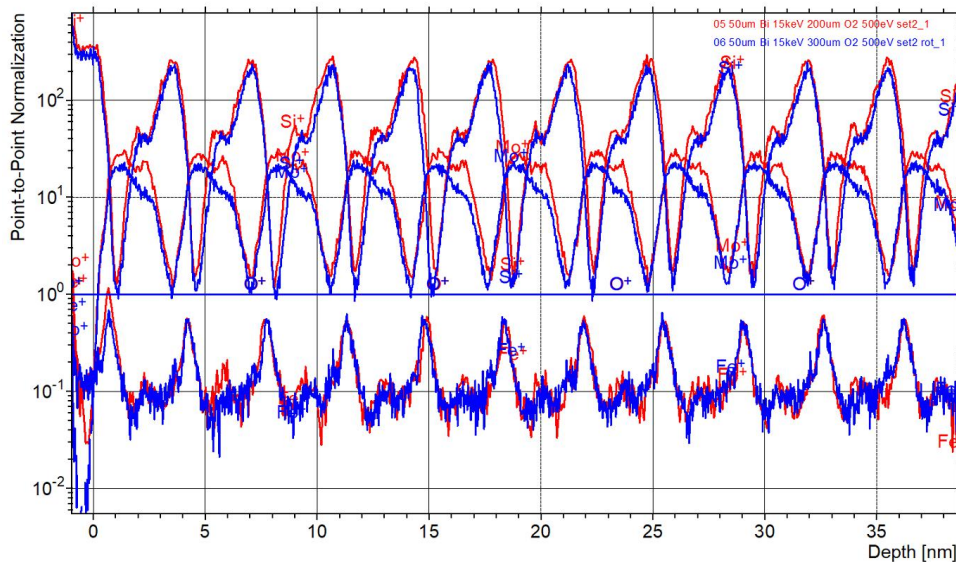
Obr. 5.5: Hĺbkový profil Röntgenového zrkadla s rotáciou vzorky počas merania: $E(\text{Bi}_1^+) = 15 \text{ keV}$; analyzovaná oblasť $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$; odprašovaná oblasť $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$; atmosféra O_2 ; tlak $p(\text{O}_2) = 1 \times 10^{-5} \text{ mBar}$. Signály sú normalizované na signál O^+ .

Pre ukážku bol vytvorený 3D hĺbkový profil z tohto merania, na profile sú znázornené ióny prvkov Si, Mo, Fe a Cr.



Obr. 5.6: 3D hĺbkový profil Röntgenového zrkadla s rotáciou vzorky, zobrazené su ióny Si^+ (modrá), Mo^+ (červená), Cr^+ (zelená) a Fe^+ (žltá): $E(\text{Bi}_1^+) = 15 \text{ keV}$; analyzovaná oblasť $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$; odprašovaná oblasť $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$; atmosféra O_2 ; tlak $p(\text{O}_2) = 1 \times 10^{-5} \text{ mBar}$.

Pre porovnanie merania bez a s rotáciou vzorky boli obidva hĺbkové profily vynesené do jedného grafu (obrázok 5.7). Obidva profily boli nakalibrované na hrúbku jednej vrstvy 3.5 nm [34], s intenzitou normalizovanou na intenzitu kyslíka.



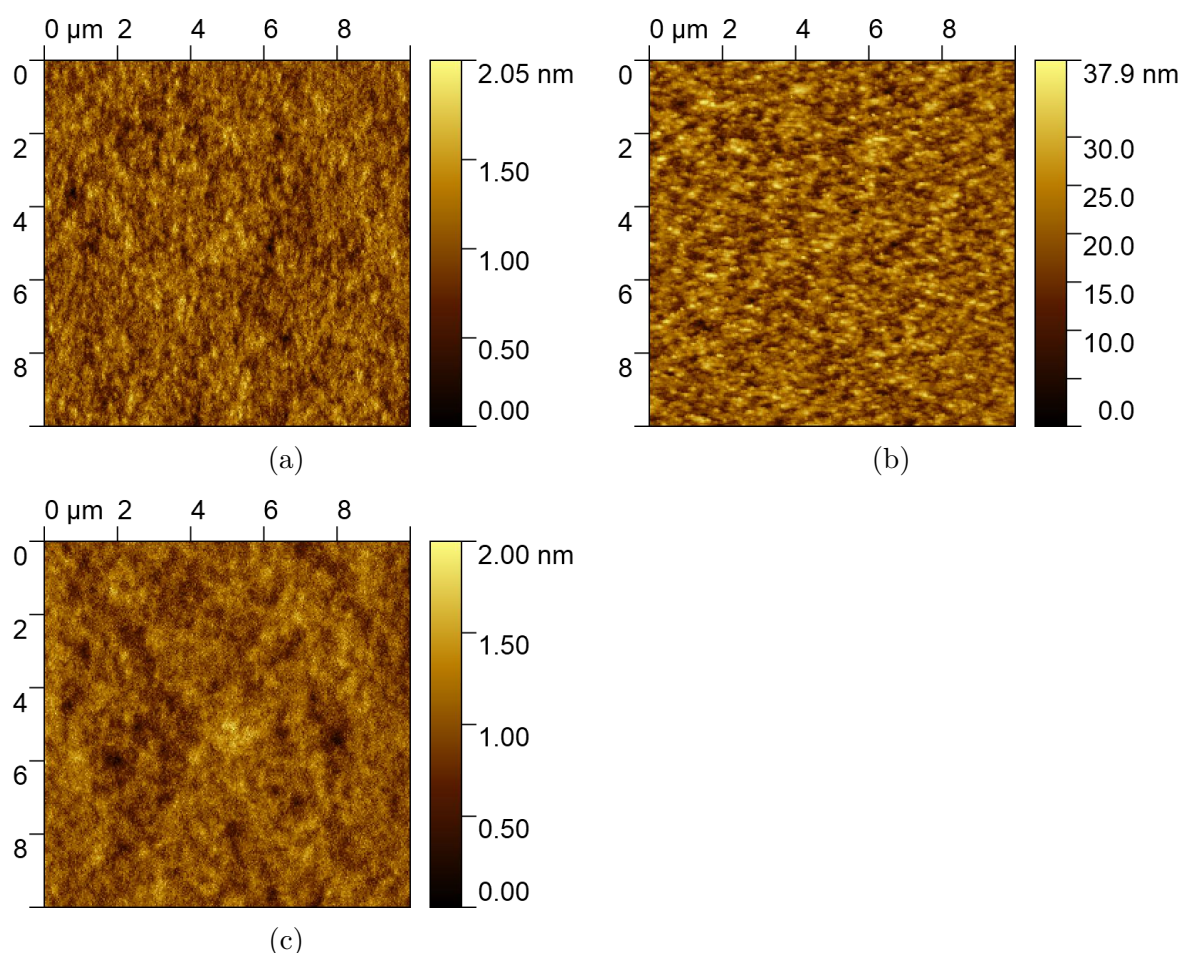
Obr. 5.7: Porovnanie hĺbkových profilov pre meranie so statickou (červená) a rotujúcou (modrá) vzorkou. Signály sú normalizované na signál O^+ a nakalibrované na hrúbku jednej vrstvy 3.5 nm .

Na obrázku 5.7 je pozorovateľný posun spektier, čo môže byť spôsobené nepresnosťou v hĺbkovej kalibrácii. Hĺbková kalibrácia bola robená na základe zmeranej hrúbky jednej

vrstvy a nie z celkovej hĺbky odprášeného krátera, meranej pomocou AFM¹ alebo profilometra. Okrem profilov hlavných prvkov Si, Mo a O bol zobrazený aj profil Fe kvôli jeho vysokému výskytu vo vzorke. Na profiloch Si a Mo meraných bez rotácie sú pozorovateľné výrazné lokálne maximá. Na profiloch meraných s rotáciou sú tieto maximá vyhladenejšie. Pre bližší rozbor tvaru spektier, by bolo potrebné určiť správny tvar profilov. Prvý predpoklad bol, že tieto lokálne maximá sú artefakt merania. Toto však nepodporuje fakt že poloha lokálnych maxim je konštantná voči polohe hlavného maxima. Rovnako ako aj to, že profily s lokálnymi maximami boli pozorované aj v spektre 5.2, pri ktorom bolo hĺbkové profilovanie výrazne pomalšie, čo malo zamedziť vzniku prominentných artefaktov v zaznamenanom spektre.

5.1.1. Porovnanie drsnosti povrchu

Na záver boli zmerané profily na AFM mikroskope pre porovnanie drsnosti povrchu pred a po meraní a po meraní so zapnutou rotáciou vzorky. Merania boli robené na AFM prístroji SPM² Dimension Icon of spoločnosti Bruker. Výsledné profily sú na obrázku 5.8.



Obr. 5.8: AFM profily vzorky Röntgenového zrkadla povrchu (a), dna krátera (b) a dna krátera so zapnutou rotáciou vzorky (c). Veľkosť scannov je $(10 \times 10) \mu\text{m}^2$.

Priemerná drsnosť povrchu vzorky (obrázok 5.8a) bola: $R_q^3 = 0.17 \text{ nm}$ a vlnitosť povrchu bola $W_q = 0.10 \text{ nm}$. Po meraní boli hodnoty na dne krátera (obrázok 5.8b): $R_q =$

¹Mikroskopia atomárnych síl, anglicky Atomic Force Microscopy.

²Scanning Probe Microscopy

³Všetky hodnoty boli brané ako RMS, Root Mean Square hodnoty.

5.2. MERANIA IN-GAN KVANOVÝCH JÁM

4.3 nm a vlnitosť dna krátera bola $W_q = 2.1$ nm. Tieto hodnoty sú o rád vyššie ako pre neporušený povrch, boli spôsobené efektom zdrsnovania povrchu procesom odprašovania. Po zapnutí rotácie vzorky (obrázok 5.8c) bola výsledná drsnosť povrchu $R_q = 0.12$ nm a vlnitosť $W_q = 0.17$ nm. Táto drsnosť je podobná ako drsnosť povrchu pred analýzou, z čoho vyplýva, že pri zapnutí rotácie vzorky dochádza k minimalizácii efektov odprašovania na povrch vzory.

5.2. Merania In-GaN kvanových jám

Štruktúry kvanových jám boli rastené na zafirovom (Al_2O_3) substráte molekulárnou zväzkovou epitaxiou (MBE). Vzorky obsahovali rôzne počty kvanových jám, tieto boli ešte zoskupené po rôznych počtoch. Študované boli tri vzorky: 32 a 62. Vzorka 32 obsahovala dve sady po 5 kvanových jamách a vzorka 62: 15 jám v jednej sérii [35].

Podobne ako pri meraní vzorky Röntgenového zrkadla aj pre tieto vzorky bolo urobených viacero meraní s cieľom určiť optimálne parametre merania. Optimalizované parametre primárneho zväzku boli: energia $E_k = 30$ keV a použité ióny: Bi_3^+ . Pre hĺbkové profilovanie bol použitý zväzok O_2^+ s energiou $E_k = 500$ eV a prúde $I_{DC} = 120$ nA. Výsledné profily boli z analyzovanej plochy $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$ a rozmer odprašovaného krátera bol $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$.

Tieto vzorky boli merané pri izbovej teplote $T \approx 300$ K a pri zníženej teplote $T = 133$ K ≈ -140 °C. V hĺbkových profiloch sa kvanové jamy zobrazujú ako intenzitné maximum signálov In a jeho kombinácií.

5.2.1. Vzorka 32

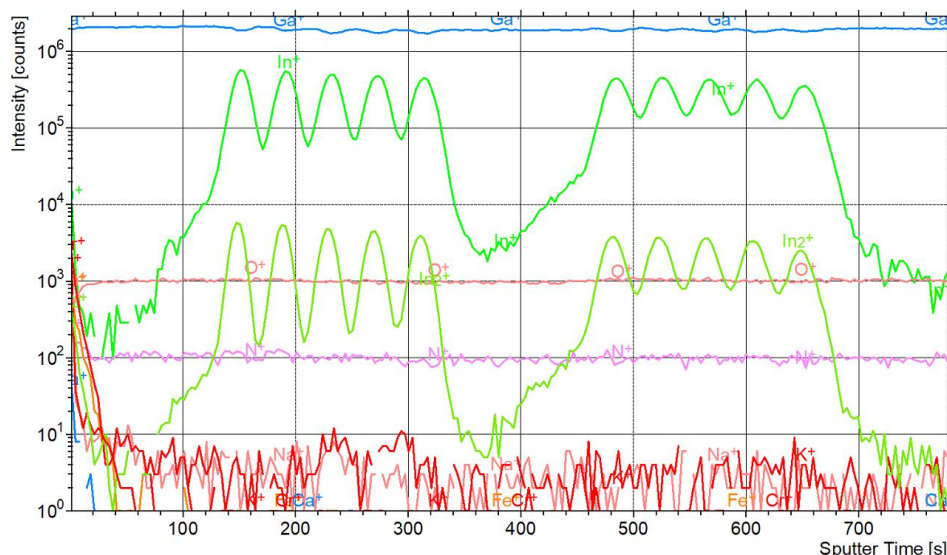
Hĺbkové spektrum vzorky 32 merané pri izbovej teplote je na obrázku 5.9. Na obrázku sú znázornené profily hlavných iónov In, Ga, N a O a In_2 . Profily prvkov In a Ga sú presýtené a preto sú ich tvary deformované. Pre ich porovnanie boli zobrazené profily iónu In_2 .

V hĺbkovom profile sú ešte znázornené profily Na, K, Ca a Fe. Z profilov Na a K je zjavné, že týmito prvkami je kontaminovaný povrch vzorky.

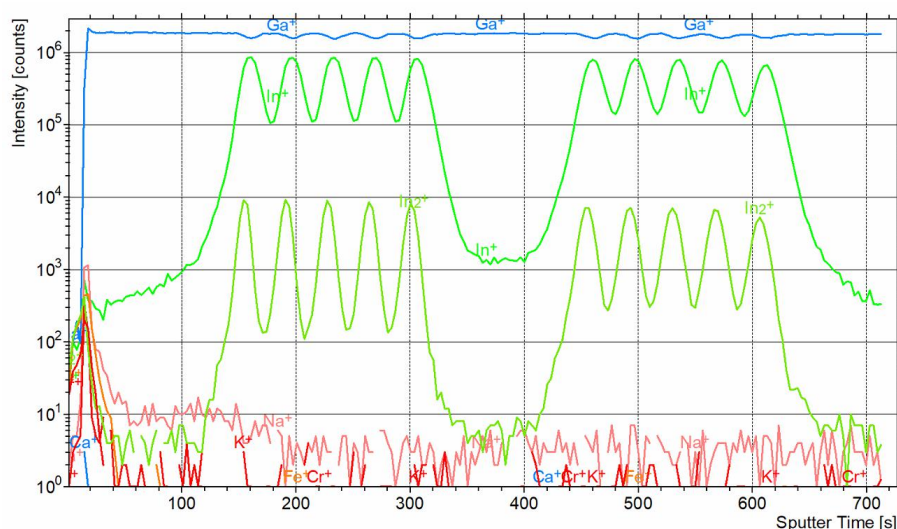
Amplitúda signálu In_2^+ v prvej sade kvanových jám dosahovala hodnotu maximálne 1.4 rádu medzi prvým maximom a prvým minimom. Táto hodnota poklesla na konci prvej sady jám na hodnotu 1.15 rádu medzi posledným maximom a minimom. V druhej sade bola hodnota amplitúdy len 0.56 rádu maximálne a minimálne 0.36 rádu.

Aj v týchto profiloch dochádzalo k postupnej degradácii hĺbkového rozlíšenia, to mohlo byť v prípade týchto vzoriek dôsledkom prvotnej drsnosti povrchu, ktorá sa postupným odprašovaním zväčšovala. Alebo došlo k premiešavaniu materiálu dopadom vysoko energetických iónov, ako bolo ukázané na vzorke Röntgenového zrkadla (obrázok 5.1).

Meranie bolo zopakované za zníženej teploty $T = -140$ °C. Profil vzorky po ochladení (obrázok 5.10) pre ióny In_2^+ vykazuje vyššiu amplitúdu aj intenzitu. V prvej sade jám je hodnota amplitúdy v priemere 1.73 rádu s maximálnou hodnotou 1.84 rádu. V druhej sade kvanových jám má amplitúda hodnotu 1.24 rádu.



Obr. 5.9: Hĺbkový profil vzorky 32 meraný pri izbovej teplote: $E(\text{Bi}_3^+) = 30 \text{ keV}$; analyzovaná oblasť $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$; odprašovaná oblasť $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$; atmosféra O_2 ; tlak $p(\text{O}_2) = 1 \times 10^{-5} \text{ mBar}$. Profil je nekalibrovaný.

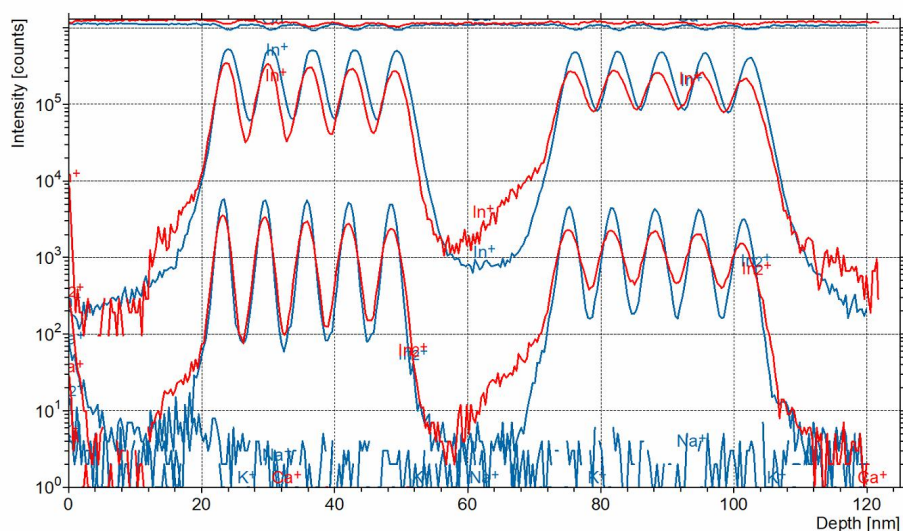


Obr. 5.10: Hĺbkový profil vzorky 32 pri teplote $T = -140\text{ }^{\circ}\text{C}$: $E(\text{Bi}_3^+) = 30\text{ keV}$; analyzovaná oblasť $(50 \times 50)\mu\text{m}^2$; odprašovaná oblasť $(200 \times 200)\mu\text{m}^2$; atmosféra O_2 ; tlak $p(\text{O}_2) = 1 \times 10^{-5}\text{ mBar}$, vyznačené sú profily In, Ga, N, O, K, Na, H. Profil je nekalibrovaný.

Z profilov prvkov Na a K je opäť zrejmé, že povrch vzorky je kontaminovaný týmito prvkami. Navyše je signál Na vyšší ako signál pozadia aj po dosiahnutí prvých kvantových jám. Presný tvar profilov alkalických kovov je ťažké určiť pre ich vysokú mobilitu v materiáli. Tieto profily je možné presne určiť použitím kyslíkového klastrového primárneho zväzku [36].

Porovnanie hĺbkových profilov pri izbovej a zníženej teplote je na obrázku 5.11. Profily zobrazujú ióny Ga, In a In₂. Spektrá vykazujú rozdiely. Prvý rozdiel je už spomenutý rozdiel amplitúd v oblasti kvantových jám. Druhý rozdiel je posun hĺbkového profilu pri zníženej teplote. Toto naznačuje pomalšie odprašovanie materiálu pri nízkych teplotách. Ale taktiež to môže byť spôsobené mierne iným prúdom I_{DC} v stoje, ako pri nízkoteplotných meraniach nieje možné merať tento prúd.

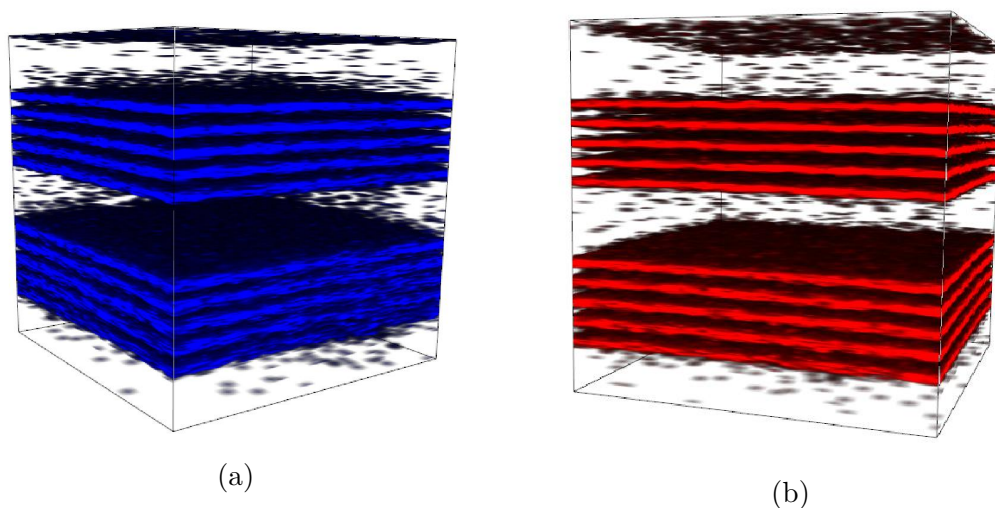
5.2. MERANIA IN-GAN KVANOVÝCH JÁM



Obr. 5.11: Porovnanie tvaru spektier pre vzorku 32 pri izbovej teplote (červená) a pri zníženej teplote $T = -140\text{ °C}$ (modrá).

Ďalším rozdielom v týchto profiloch je tvar spektier In a In₂. V profile pri izbovej teplote sa vyskytuje pred oboma sadami jám výrazné plece, ktoré je minimálne v profiloch meraných pri nízkych teplotách.

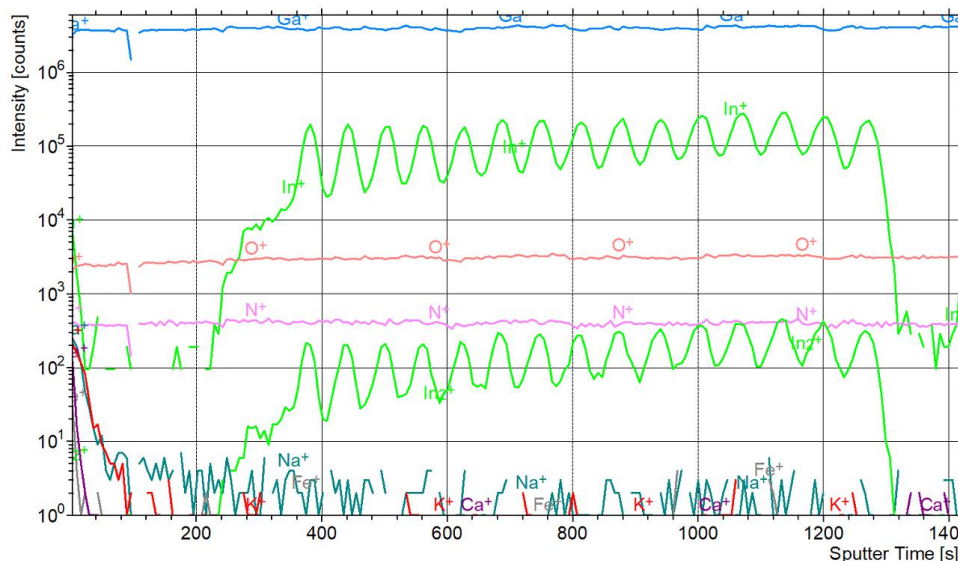
Pre porovnanie sú priložené 3D hĺbkové profily iónov In₂⁺ na obrázku 5.12. Tieto profily vizualizujú nárast amplitúd v oblastiach kvantových jám. Profil pri izbovej teplote (obrázok 5.12a) má pomerne široké jednotlivé jamy s výrazným signálom v oblastiach medzi jamami. Oproti tomu v profile za zníženej teploty (obrázok 5.12b) sú jednotlivé jamy tenšie a hodnoty pozadia medzi nimi sú nižšie.



Obr. 5.12: 3D hĺbkové profily vzorky 32 meranej pri izbovej teplote (a) a pri teplote $T = -140\text{ °C}$ (b). Intenzita signálu zodpovedá sýtosti farieb. Profily sú hĺbkovo kalibrované podľa hodnoty odprašovacieho koeficientu gália, ako matricového materiálu.

5.2.2. Vzorka 62

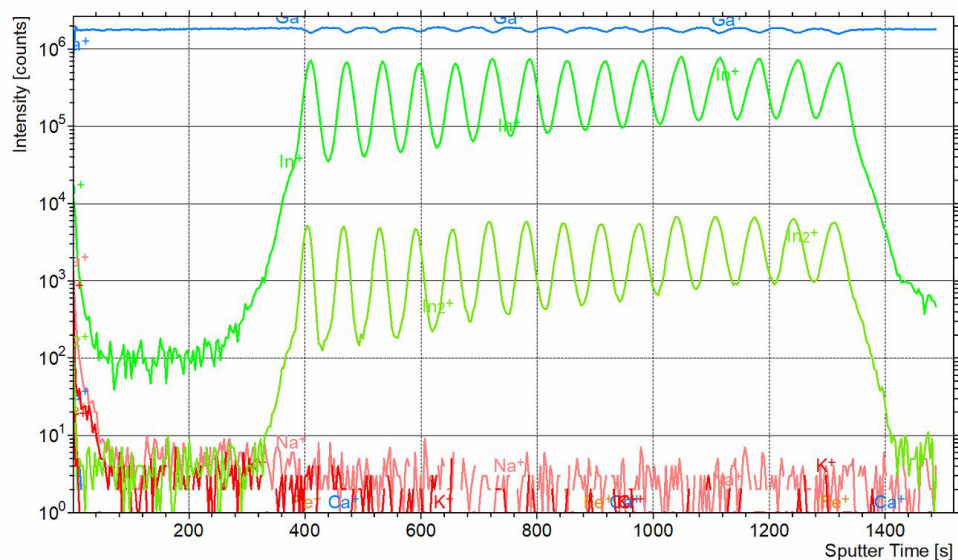
Vzorka 62 obsahovala 15 kvantových jám v jednej sérii. Pri tejto vzorke dochádzalo k najväčšej deformácii spektra. Spektrum zmerané pri izbovej teplote je znázornené na obrázku 5.13.



Obr. 5.13: Hĺbkový profil vzorky 62 meraný pri izbovej teplote: $E(\text{Bi}_3^+) = 30 \text{ keV}$; analyzovaná oblasť $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$; odprašovaná oblasť $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$; atmosféra O_2 ; tlak $p(\text{O}_2) = 1 \times 10^{-5} \text{ mBar}$.

V tomto hĺbkovom profile je signál In_2 slabší ako v prípade vzorky 32. Signál je iba tesne nad hranicou pozadia, s prvým minimom s intenzitou $2 \cdot 10^1$. Amplitúdy signálov sú pri tejto vzorke malé. Najväčší rozdiel je len 1.11 rádu medzi prvým maximom a minimom. Tento rozdiel postupne klesá s minimálnou hodnotou 0.34 rádu dosiahnutou pre 10. a 11. kvantovú jamu. Na konci sady amplitúda opäť rastie.

Po ochladení vzorky na teplotu $T = -140^\circ\text{C}$ je amplitúda prvých kvantových jám 1.4 rádu. Tento rozdiel sa s narastajúcou hĺbkou znižuje, minimálnu hodnotu 0.58 rádu dosahuje pri poslednej kvantovej jame.



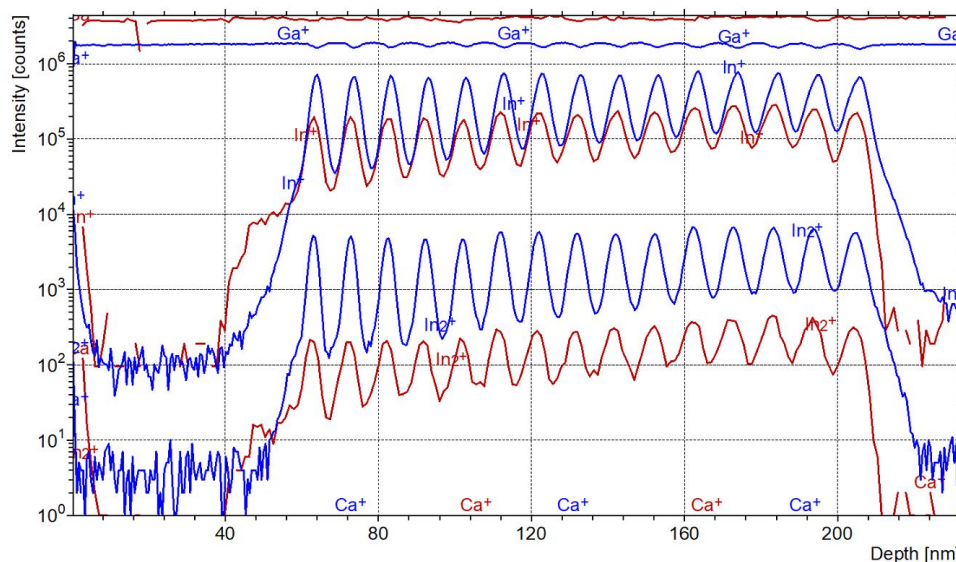
Obr. 5.14: Hĺbkový profil vzorky 62 pri teplote $T = -140^\circ\text{C}$: $E(\text{Bi}_3^+) = 30 \text{ keV}$; analyzovaná oblasť $(50 \times 50) \mu\text{m}^2$; odprašovaná oblasť $(200 \times 200) \mu\text{m}^2$; atmosféra O_2 ; tlak $p(\text{O}_2) = 1 \times 10^{-5} \text{ mBar}$.

Pre porovnanie sú profily Ga, In a In_2 znázornené v spoločnom grafe na obrázku 5.15. Z obrázku možno vidieť, že signály In a In_2 majú pri zníženej teplote vyššiu celkovú

5.2. MERANIA IN-GAN KVANOVÝCH JÁM

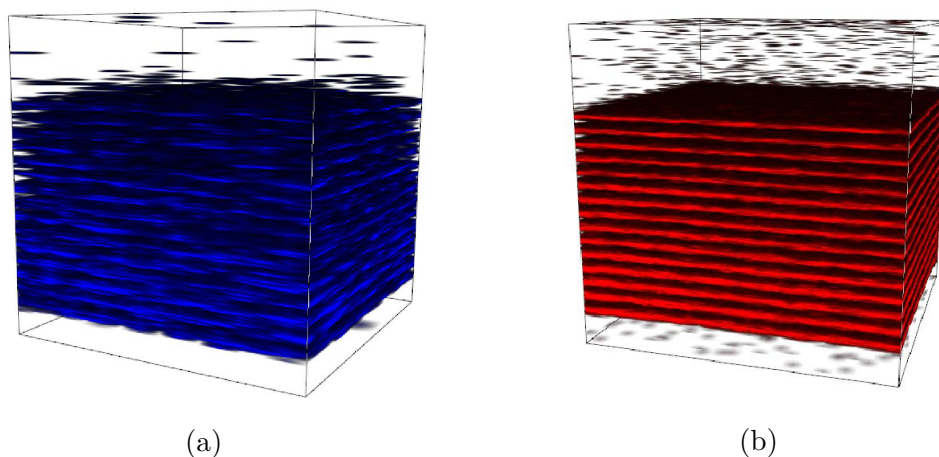
intenzitu, ale signál Ga má pri zníženej teplote merania nižšiu intenzitu. Profily merané pri zníženej teplote majú vyšší signál a lepšie hĺbkové rozlíšenie.

Aj v prípade týchto spektier je v profile In meranom pri izbovej teplote pred nástupom samotných kvantových jám pozorovateľné plece. Táto charakteristika je v profile meranom pri zníženej teplote silno potlačená. Pri meraní za zníženej teploty bolo pozorovateľné plece na profiloch In a In₂ aj za oblasťou kvantových jám.



Obr. 5.15: Porovnanie hĺbových profilov pre vzorku 62 meraných pri izbovej teplote (červená) a teplote $T = -140\text{ }^{\circ}\text{C}$ (modrá). Intenzita signálu zodpovedá sýtosti farieb. Profily sú hĺbkovo kalibrované podľa hodnoty odprašovacieho koeficientu gália, ako matricového materiálu.

Pre lepšie znázornenie rozdielov medzi meraním pri zníženej a izbovej teplote boli pridané 3D hĺbkové profily zobrazené na obrázku 5.16.



Obr. 5.16: 3D hĺbkové profily In_2^+ iónov vzorky 62 získané z merania pri izbovej teplote (a) a pri teplote $T = -140^\circ\text{C}$ (b).

3D profil z merania pri izbovej teplote (obrázok 5.16a) je pomerne nejasný, pri hlbších kvantových jamách sa nedá jednoznačne povedať, či sa jedná o zámerne deponované jednotlivé vrstvy alebo len segregáciu india v jednej súvislej vrstve. Naproti tomu z merania pri zníženej teplote (obrázok 5.16b) je viditeľný výrazný rozdiel medzi maximami a

minimami v oblasti kvantových jám. Z tohto 3D hĺbkového profilu sa už jednoznačne dá povedať, že sa jedná o zámerne deponované vrstvy india v substráte GaN.

V oboch pároch meraní došlo k zmene intenzít signálov iónov In^+ , In_2^+ a Ga^+ . Pri vzorke 32 došlo po ochladení k slabému poklesu signálu Ga^+ , zvýšeniu amplitúdy In_2^+ a miernemu zvýšeniu amplitúdy a intenzity v signále In^+ . Pri vzorke 62 došlo po ochladení k výraznejšiemu poklesu intenzity signálu Ga^+ a zvýšeniu intenzity a amplitúdy signálov In_2^+ a In^+ iónov.

6. Návrh rotačného držiaka vzoriek

Pre zachovanie kvality vzniknutých plôch je výhodné produkovať rezy vzoriek vo vákuu a následne merať parametre vrstiev bez vystavenia vzorky atmosfére. Preto je výhodné vyrobiť držiak vzoriek so zabudovaným náklonom okolo osi x , kompatibilným so systémom uchytania a ovládania v zariadení SIMS. Týmto bude možné opracovávať povrchy vzorky bez kontaminácie spôsobenej mechanickým obrábaním alebo presunom medzi zariadeniami. Ďalšou motiváciou návrhu sa výroby tohto držiaka bola nadchádzajúca montáž tretieho tubusu primárnych iónov do používaného prístroja. Tento prístroj by mal dosahovať lepšie rozlíšenie ako stávajúce tubusy, preto je plánované využívanie na zobrazovanie povrchov niekedy SIMS ale aj pomocou sekundárnych elektrónov a opracovávanie vzoriek týmto zväzkom.

6.1. Použité materiály

Pri navrhovaní zariadení do UHV aparatúr je nutné brať ohľad na použité materiály a je nevyhnutné sa oboznámiť s vlastnosťami UHV kompatibilných materiálov. Primárnou vlastnosťou materiálov použitých do UHV je tlak nasýtených pár. Pre montované súčasti je nutné zaručiť kompatibilitu s týmto prostredím nielen z hľadiska funkčnosti, ale aj z hľadiska možného znečistenia UHV prostredia a študovaných vzoriek použitím nevhodných materiálov. Napríklad, ak má dochádzať v UHV k vzájomnému posuvu dvoch plôch trením, je nutné používať materiály, napríklad meď a berýliový bronz CuBe_2 , ktoré budú po sebe klzať aj bez vzduchového filmu, ktorý je bežne prítomný v takýchto prípadoch. V opačnom prípade môže dochádzať k mikro zvarom v oblasti styku a následnému zadretiu spoja. Materiály použité vnútri UHV komory musia spĺňať najprísnejšie požiadavky na čistotu. Je neprípustné používať väčšinu plastov, mazív a dokonca aj niektoré zliatiny. Použitím týchto materiálov pri nízkych tlakoch, by dochádzalo k ich odparovaniu, čo by vytváralo nechcenú plynovú záťaž komory, ale aj kontamináciu skúmaných vzoriek.

Najčastejšie používanými materiálmi do UHV prostredia sú korózii odolná oceľ¹, ktorá vyniká pevnosťou, opracovateľnosťou, zvariteľnosťou a cenovou dostupnosťou. Medzi najpoužívanejšie korózii odolné ocele používané v UHV systémoch sa radia ocele EN 1.4301 a EN 1.4306, tiež nazývané AS 304 a AS 304L. Pre nemagnetické vlastnosti a vyššiu odolnosť sa používa EN 1.4404, tiež označovaná AS 316L². Z nehrdzavejúcej ocele sa vyrábajú vákuové komory, príruby, spojovacie kusy a najrôznejšie nosné prvky vo vnútri komôr. Ďalším hojne používaným materiálom do UHV prostredia je hliník a jeho zliatiny, napríklad nami použitá zliatina EN AW 6061. Výhodou hliníka a jeho zliatin je jeho nízka hustota a jednoduchá opracovateľnosť. Z hliníka sa vyrábajú prevažne komponenty do vákuových komôr, ktoré nie sú príliš zaťažované a namáhané, alebo prvky, ktoré sa pri prílišnom namáhaní majú deformovať pre ochránenie iných komponentov pred deformáciou.

Pre špeciálne aplikácie sa volia menej bežné materiály z neželezných kovov a keramických materiálov. Pre vysokoteplotnú odolnosť sa používajú W, Mo a Ta, ktoré sú schopné udržať si svoje mechanické vlastnosti pri teplotách presahujúcich 1200 °C. Pri aplikáciách kde je potrebná vysoká tepelná alebo elektrická vodivosť sa používa takzvaná bezkyslí-

¹Bežne označovaná ako nerezová oceľ, alebo tiež nerez.

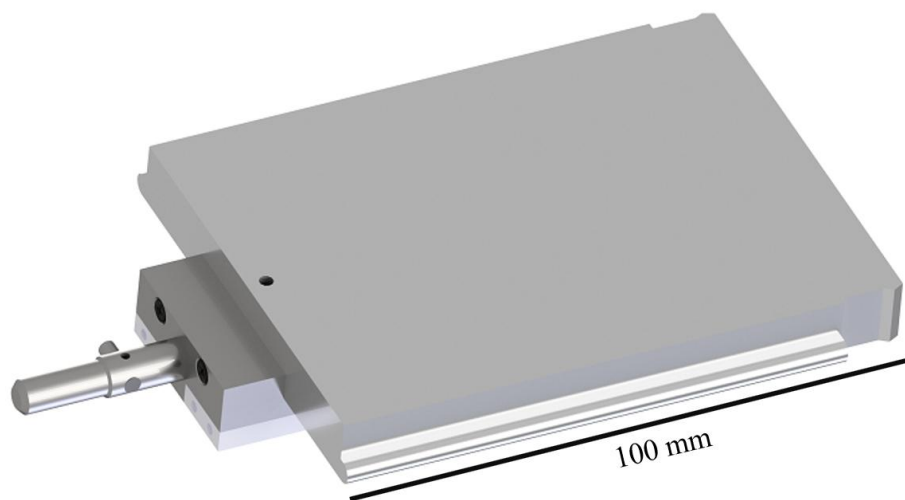
²Viacie o značení ocelí je napríklad v [37].

katá med³. Ďalším materiálom používaným v UHV je titán. Titán sa používa hlavne v prípadoch kde sa vyžaduje vysoká pevnosť, diamagnetické vlastnosti a nízka hustota.

Pre izoláciu, či už elektrickú alebo tepelnú sa používajú zväčša materiály na báze skla alebo sklokeramiky. Často používané materiály sú napríklad MACOR^{®4} a keramiky na báze Al₂O₃ a SiO₂. Taktiež niektoré plasty je možné použiť v UHV prostredí v oblasti izbových a mierne zvýšených teplôt. Medzi takéto plasty patria PTFE⁵ a PEEK⁶.

6.2. Základný tvar

Konštruovaný držiak vzoriek bol tvarovaný špecificky pre použitie v zariadení ToF-SIMS⁵, ktoré používa pri manipulácii so vzorkami pomerne špecifické držiaky. Ich základný pôdorys je obdĺžnik o stranách (100 × 70) mm². Ich hrúbka je medzi 7 ~ 11 mm v závislosti od typu držiaka. Základný tvar držiaka je na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Pohľad na základný tvar držiaka vzoriek do zariadenia SIMS.

Tieto držiaky sa do komory upevňujú systémom postranných kolajničiek a zámkom v prednej časti držiaku. Presun vo vákuu medzi preparačnou a analyzačnou komorou je zaistený pomocou magnetickej tyče s bajonetovým zámkom.

Na kontaktovanie zariadení, ako vyhrievanie vzorky, meranie teploty a iné, je v držiaku nainštalovaný systém pružinových konektorov. Tento systém sa skladá z keramických kvádrov s priechodnými dierami, cez ktoré prechádzajú skrutky ako vodiče a kontakty na držiak vzorky. Tieto skrutky sú držané v polohe pružinkami, ktoré zaistia, že pri zavedení držiaka vzorky do komory dôjde k požadovanému elektrickému kontaktu.

6.2.1. Systém náklonu

Od výsledného držiaka sme požadovali schopnosť nakloniť vzorku o $\pm 45^\circ$ od horizontálnej polohy. Orientácia osi náklonu je vďaka možnosti rotácie držiaka okolo osi x nepodstatná. Pre rozmery použitého systému náklonu bola zvolená os rotácie rovnobežná s dlhšou stranou držiaka.

³Med, ktorej čistota je vyššia ako 99.99 %, anglicky: Oxygen-free Copper, OF-Cu.

⁴Pre blyžšie informácie o tomto materiáli [38].

⁵Polytetrafluoretylén, tiež označovaný aj Teflón [39].

⁶Polyéteréterketón [40].

6.2. ZÁKLADNÝ TVAR

Pre nakláňanie vzorky by bolo najjednoduchšie použiť piezorotátor. Takéto zariadenia sú pomerne veľké. Najmenšie majú rozmery $(20 \times 20 \times 10) \text{ mm}^3$ (Š $\times$ V $\times$ H). V prípade požadovanej rotácie, by polovica výšky rotátora vyčnievala nad rovinu držiaka, čím by hrozila kolízia nielen s extrakčnou elektródou ale aj s elektródami iónových zdrojov a ďalších prítomných zariadení. Preto sme zvolili ako pohon nakláňania lineárny piezomotor.

Z použitia lineárneho posunu pre rotáciu vzorky vyplýva nutnosť navrhnutia systému prevodu posuvného pohybu na pohyb rotačný. Najjednoduchším spôsobom pri daných rozmerových limitáciách je použitie systému kladiek a nekonečného lana, s tým že lano a kladka budú mať dostatočné trenie, aby pri potiahnutí za lano došlo k pootočeniu kladky. Pri maximálnom posuve piezomotoru o 21 mm je podľa vzťahu:

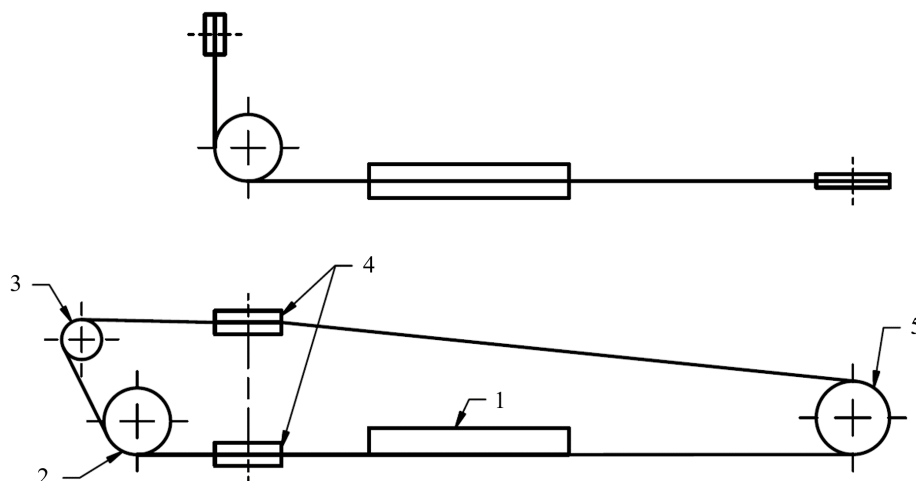
$$L = 2\pi r = \pi D \quad (6.1)$$

kde L je dĺžka kružnice, r je polomer a D je priemer, optimálny priemer použitej kladky pre pootočenie vzorky o 180° $D \approx 13,4 \text{ mm}$.

Poloha horizontálnej roviny vzorky bola zvolená ako horná rovina držiaka, pre bezpečnosť prístroja. Toto riešenie vyzdvihne osku a kladku náklonu nad hornú rovinu držiaka, ale zabezpečí možnosť použitia štandardnej Faradayovej diery a možnosť upevnenia ďalších vzoriek mimo systém náklonu, pre štandardné merania bez nutnej veľkej zmeny z-ovej súradnice držiaka vzorky.

Pre zaistenie jednoduchosti pohybu jednotlivých kladiek vo výslednom systéme boli použité ložiská. Ložiská museli byť kompatibilné s podmienkami UHV a museli mať primerané rozmery. Rozhodli sme sa použiť keramické ložiská o rozmeroch $d = 4 \text{ mm}$; $D = 9 \text{ mm}$; $t = 4 \text{ mm}$ s puzdrami a guľôčkami z oxidu zirkónu a kliečkou z plastu PEEK, ktorý je UHV kompatibilný a vydrží aj zvýšené teploty.

Samotný systém náklonu sa skladá z piatich kladiek. Tento systém vychádza z umiestnenia piezomotoru rovnobežne s osou náklonu. Preto je nutné lano otočiť o 90° do roviny kolmej na os rotácie. Ďalšie kladky sú použité pre smerovanie lana na kladku náklonu a na vrátenie lana do piezomotoru z druhej strany, čím sa vytvorí nekonečná slučka. Výsledný návrh kladkového systému je na obrázku 6.2.



Obr. 6.2: Schematický nákras výsledného lanového systému. 1: piezomotor, 2: usmerňovacia kladka, 3: kladka nakláňania vzorky, 4: kladky natočenia lana o 90° , 5: ukončovacia kladka.

Tento systém zaisťuje aj to, že pri posunutí piezomotoru, nedochádza k zmene napätia lana. Takáto zmena by nastávala, ak by bolo lano odklonené od roviny ukotvenia na pie-

zomatore. Tento efekt vzniká zmenou strán dvoch pravouhlých trojuholníkov. Jednotlivé strany týchto trojuholníkov sú prevýšenie lana medzi montážnou rovinou piezomatora a bodom dotyku na kladke, vzdialenosť okraja pohyblivej plochy piezomatora od kladky a dĺžka lana. Posledné dve vzdialenosti sa pri posune piezomatora menia. Ak je v systéme jeden takýto trojuholník, dochádza k povoľovaniu, respektíve napínaniu lana pri posunutí piezomatora k a od kladky na ktorej sa vytvára daný trojuholník. Ak sú takéto trojuholníky v systéme dva, je veľkosť výsledného napínania alebo povoľovania lana závislá na veľkosti týchto trojuholníkov. Pokiaľ sú tieto trojuholníky v nulovej polohe piezomatora totožné a zrkadlovo orientované je výsledný efekt nulový.

Možnými spôsobmi eliminácie tohto efektu je presné uloženie lana bez prevýšenia v tejto oblasti, alebo použitím napínacieho elementu.

V našom prípade by použitie napínacieho elementu bolo dosť komplikované kvôli rozmerom a prostrediu v ktorom bude zariadenie pracovať. Pretože v UHV prostredí sa trecie plochy nemôžu mazať, bolo by nutné všetky takéto plochy leštiť pre dosiahnutie minimálnych hodnôt drsnosti, čo je pri rozmeroch a tvaroch použitých súčiastok zložitý proces. Preto je jednoduchšie navrhnúť sústavu kladiek, tak aby sekcia lana okolo piezomatora neobsahovala prevýšenie.

Takýto systém rieši aj situáciu keby došlo k zaseknutiu jednej z kladiek, alebo vzorky o nejakú prečnievajúcu hranu. V navrhnutom systéme by došlo len k prešmyknutiu lana na zaseknutom elemente, čo sa v prípade kladky naklápania dá jednoducho opraviť pri vybratí držiaka z komory.

6.3. Držiak s elektrickým náklonom vzoriek

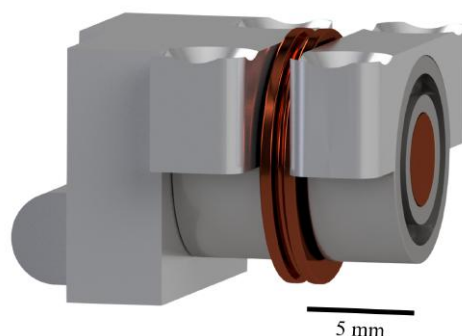
Výsledný držiak používa piezomotor od firmy SmarAct s dĺžkou posunu $\pm 10,5$ mm s konštrukčnými rozmermi $(33 \times 17 \times 8,5)$ mm³ ($\bar{S} \times V \times H$)⁷. Tento motor je uchytený v tele držiaka na nehrdzavejúcom plechu UCS-01-02 hrúbky 1 mm pomocou štvorice skrutiek M1,6 $\times$ 4. Plech sa vkladá do vyfrézovaného uloženia v držiaku o hĺbke 1 mm. Pre zaistenie rotačného pohybu bez preťaženia boli použité keramické ložiská od výrobcu SMB Bearings [42].

Zvolili sme hrúbku držiaka 11 mm pre jeho veľký objem a schopnosť zastrešiť väčšinu potrebných konštrukčných prvkov. V tele držiaka sú dva hlavné otvory. V strednej časti je otvor pre umiestnenie nakláňaných vzoriek a v pravej časti je otvor pre uchytenie piezomotoru. Výsledný konštrukčný návrh je na výkrese UCS-01-01.

V prednej časti držiaka je uložená vracajúca kladka UCS-01-16, ktorá slúži na obrátenie chodu lana o 180° naspäť do piezomatora. Táto kladka je uchytená pomocou dvoch guľôčkových ložísk, ktoré sú uchytené v zostave pomocou držiakov UCS-01-17 a UCS-01-18 pre pravé a ľavé ložisko. Držiak pravého ložiska obsahuje ešte začiatok kolajničky uchytenia držiaku vzorky do prístroja. Detail zostavy kladky je na obrázku 6.3. Ďalej je v tejto časti priestor pre inštaláciu plechu s Faradayovou dierkou a kalibračnými štruktúrami, takzvanou A-mriežkou.

⁷Konštrukčné výkresy výrobcu udávajú rozmery $(30 \times 17 \times 8,5)$ mm³ ($\bar{S} \times V \times H$), prevzaté z [41].

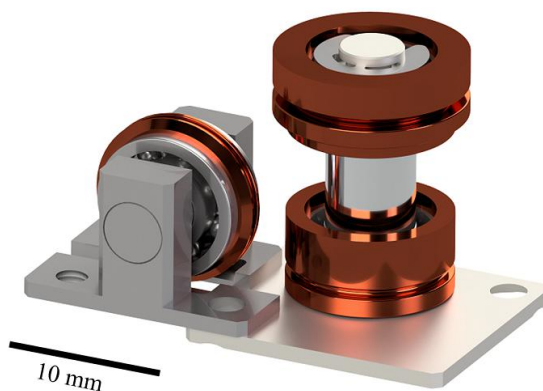
6.3. DRŽIAK S ELEKTRICKÝM NÁKLONOM VZORIEK



Obr. 6.3: Model zostavy vracajúcej kladky. Nie je v merítke

Ľavá strana držiaka je v prvej navrhovanej verzii ponechaná prázdna, v nasledujúcich verziách tu môže pribudnúť sieť závitových dier pre uchytenie vzoriek meraných štandardným spôsobom. Na funkčnom prototypu je na tejto strane upenvený zvyšok napájacieho kábla piezomotoru.

V zadnej časti držiaka je uložená sústava kladiek na otočenie pohybu lana o 90° , smerovacia kladka a kladka náhonu rotátoru vzorky. Kladky otáčania smeru pohybu lana pozostávajú z ložiska a malej lícovanej kladky spodná UCS-01-09 a vrchná UCS-01-10. Tieto kladky sú umiestnené na spoločnej oske UCS-01-08 pripevnenej k držiaku zo spodnej strany dvoma skrutkami $M2 \times 8$. Medzi kladkami je umiestnený dištančný krúžok UCS-01-11, ktorý udržiava ložiská v konštantnom rozstupe. Za touto sústavou je ďalej umiestnená smerovacia kladka UCS-01-15, pre usmernenie lana zo spodnej obracacej kladky na kladku rotátora vzorky. Táto kladka je umiestnená na jednom ložisku, ktoré je uložené na oske UCS-01-12. Táto oska je uchytená v tele UCS-01-01 pomocou držiakov UCS-01-13 a UCS-01-14.



Obr. 6.4: Model sústavy kladiek na otočenie lana o 90° a smerovacej kladky v detaile. Nie je v merítke.

Posledná súčasť systému náklonu vzorky je kladka náhonu rotátora UCS-01-06, umiestnená na oske UCS-01-03. Pre zaistenie prenosu rotačného pohybu kladky na osku a výsledne na vzorku, je medzi kladkou a oskou umiestnené miniatúrne pero UCS-01-07. Táto oska je uchytená k držiaku pomocou dvoch ložísk, na každej strane kladky jedno. Ložiská sú prichytené k zostave pomocou dvoch kusov držiaka UCS-01-05. V zadnej časti osky je drážka pre poistnú podložku, v prednej je kolmá drážka pre upevnenie držiaka vzorky UCS-01-04. Výsledná lanovodná zostava je na obrázku 6.5.

6. NÁVRH ROTAČNÉHO DRŽIAKA VZORIEK

Zostava celého modifikovaného držiaka vzorky s náklonom je na výkrese UCS-01-00. Táto zostava obsahuje aj diel bajonetového držiaka a keramické kontakty. Tieto diely boli kúpené ako zostava od výrobcu prístroja ToF-SIMS⁵, spoločnosti IONTOF.



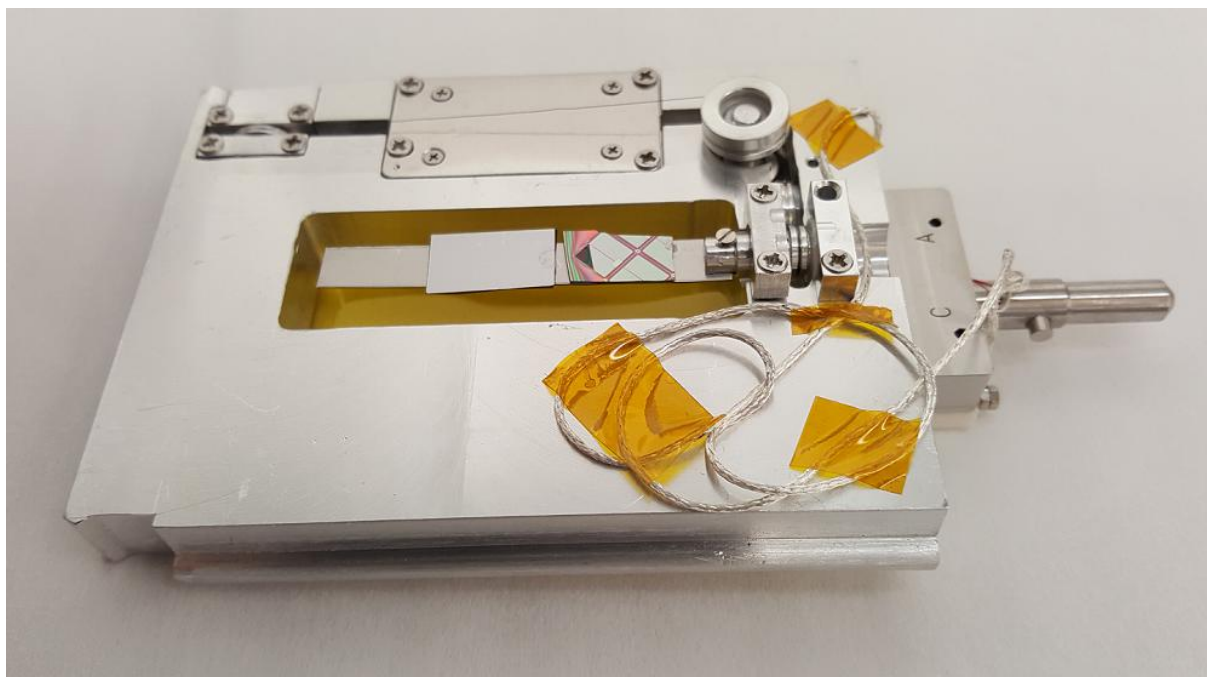
Obr. 6.5: Model lanovodnej sústavy. Vzďalenessi sú zachované ako v komplettnom modeli, pre znázornenie výsledného uloženia kladiek.

6.3.1. Výsledné vyhotovenie

Výsledný držiak s náklonom má lano z volfrámového drôtu o priemere $D = 0.1$ mm. Tento drôt sa ukázal ako dostatočne pevný a zároveň dostatočne pružný, aby sa neroztrhol pri napnutí a aby nedochádzalo k permanentnej deformácii na jednotlivých kladkách. Tento drôt má taktiež dostatočnú trakciu na kladkách, pre ich presné otáčanie.

Kladky boli vyrobené z hliníka EN AW 6061. Pre jeho lepšiu dostupnosť oproti bezkyslíkatej medi. Osy kladiek prvej verzie držiaka sú taktiež vyrobené z hliníka, pre jeho lepšiu obráбатelnosť. Išlo o osy otáčacích kladiek, smerovacej kladky a samotnej osy náklonu vzorky. Samotný držiak vzorky bol vyrobený z nehrdzavejúcej ocele EN 1.4306 hrúbky $t = 0.5$ mm, táto je pridržiavaná v oske pomocou jednej nerezovej skrutky $M1.6 \times 4$ na plochý skrutkovač. Tieto skrutkovače sa štandardne používajú pri upevňovaní vzoriek do ostatných držiakov. Vďaka tomuto sa dá počas upevňovania vzoriek do nášho držiaka vymontovať nehrdzavejúci držiak a vzorky naň prichytiť na rovnej podložke, čím sa eliminuje pravdepodobnosť deformácie držiaka a jednotlivých vnútorných komponentov systému náklonu.

Výsledný držiak je na obrázku 6.6. Počas testovania bola diera pod vzorkami prelepená zo spodnej strany kaptonovou páskou pre prípad keby došlo k uvoľneniu vzorky z držiaka. Vzorka by padla iba do držiaka a dala sa jednoducho vybrať z prístroja. Napájací kábel od piezomotora bol ponechaný relatívne dlhý, asi 30 cm, pre budúce úpravy a pre možnosť použitia piezomotora aj pre prípadné iné aplikácie. Prebytočný napájací kábel bol navinutý a prichytený o základňu držiaka pomocou kaptonovej pásky.



Obr. 6.6: Finálny držiak vzorky s náklonom.

7. Testovanie rotačného držiaka vzoriek

Cieľom meraní bolo overiť funkčnosť navrhnutého držiaka s náklonom vzorky. Držiak bol navrhnutý pre umožnenie nakloniť vzorku kolmo na osi iónových diel (obe delá sú pod uhlom 45° od normály k povrchu vzorky) pre umožnenie rezania vzorky pomocou FIB. Toto rezanie vzoriek bude primárne využívané po pridaní tretieho iónového dela na používané zariadenie, ktoré sa v dobe odovzdávania tejto práce kupuje. Zväzok z tohto iónového zdroja bude mať lepšie parametre, z čoho vyplýva aj lepšia kvalita výsledných rezov.

Pre overenie možností držiaka sme testovali zahĺadenie hrany lomu vzorky pomocou bizmutového dela. Analyzovali sme stenu krátera, v ktorej bola tenká vrstva zlata a hranu lomu.

Pred samotnými meraniami bol držiak testovaný v HV podmienkach základacej komory. Najprv pre dosiahnutie minimálneho tlaku a následne na funkčnosť systému naklápiania. Po úspešnom overení funkčnosti bolo prístupné k samotným meraniam.

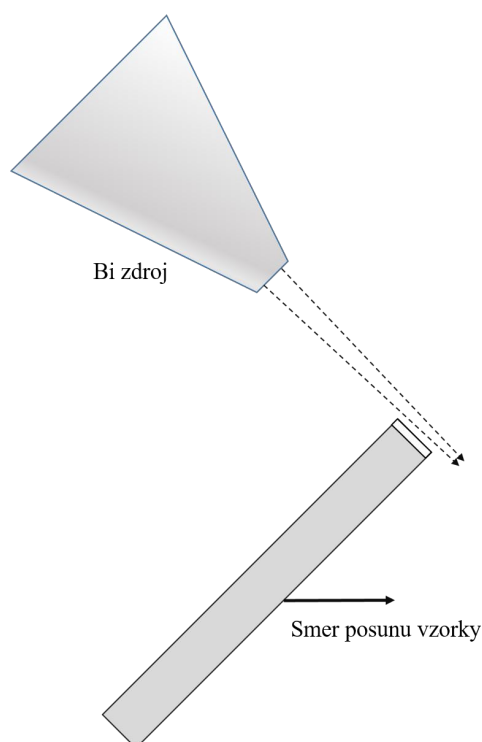
7.1. Opracovávanie hrany primárnym zväzkom

V prvom experimente bol uhol naklonenia vzorky 45° voči rovine držiaka. Pre zobrazenie hrany bol použitý signál sekundárnych elektrónov, pretože je menej citlivý na nerovnosť študovaného povrchu a nie je závislý na vzdialenosti plochy od vstupu do detektora.

Ako vzorka bola použitá časť kremíkovej dosky obsahujúcej štruktúru TIGBT od firmy ON Semiconductor. Opracovávanie bolo robené vo funkčnej oblasti čipu, v oblasti hradiel.

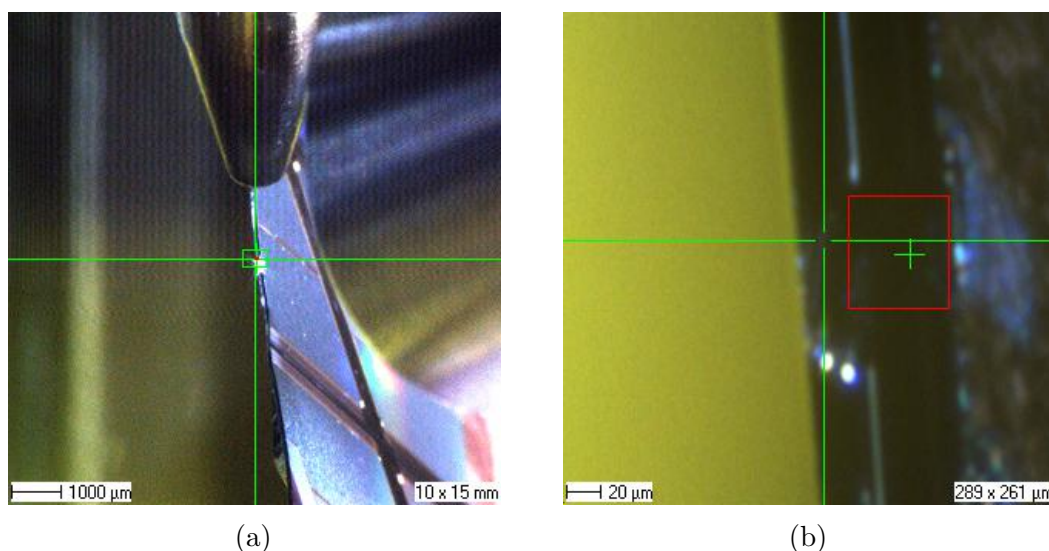
Hrana vzorky bola následne odprašovaná postupným približovaním do oblasti skenovanej primárnym zväzkom, schéma tohto procesu je na obrázku 7.1. Parametre zväzku boli: $E_k(\text{Bi}^+) = 30 \text{ keV}$ a prúde $I_{DC} = 26 \text{ nA}$.

7. TESTOVANIE ROTAČNÉHO DRŽIAKA VZORIEK



Obr. 7.1: Schematické znázornenie procesu opracovávania lomovej hrany pomocou primárneho zväzku v DC móde.

Náhľad do komory počas rezania je na obrázku 7.2. Na obrázku 7.2a je pohľad do komory cez širokouhlú kameru. Uprostred, v zelenom štvorci možno vidieť, že dochádza k odrazu na hrane v tomto mieste. Toto je spôsobené opracovaním tejto oblasti, čo zmenilo uhol pod ktorým na túto časť hrany dopadá svetlo.

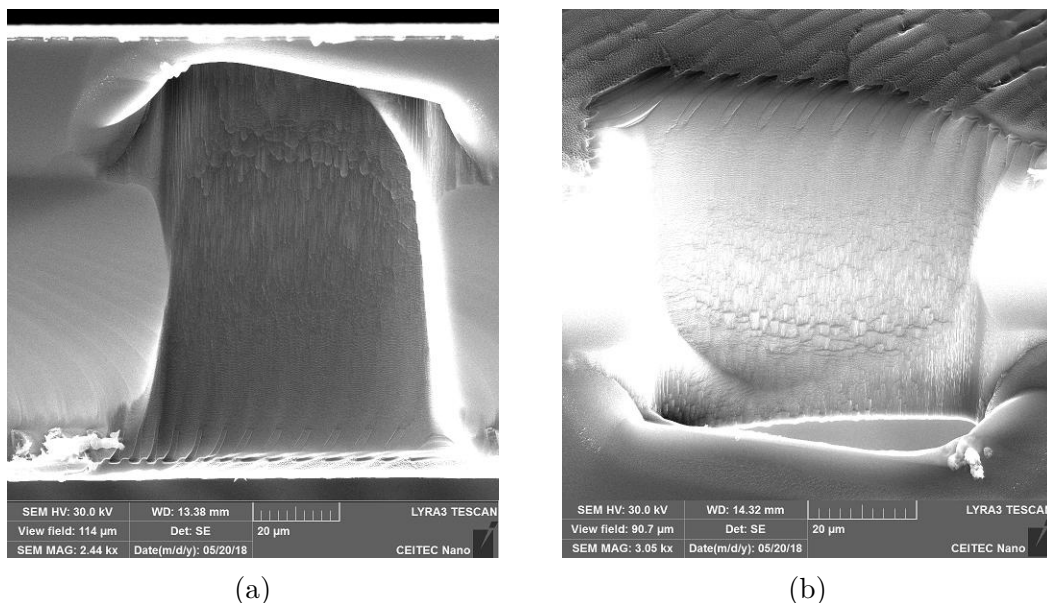


Obr. 7.2: Náhľad do komory SIMS počas opracovávania hrany (a) a detail (b). Červený štvorec v detailnom náhľade znázorňuje zorné pole iónového zväzku. Samotné rastrovanie bolo obmedzené na tenký pás pri pravom okraji tohto poľa.

V detailnom pohľade, obrázok 7.2b je viditeľná len nepatrná zmena hrany v oblasti pod ľavým dolným rohom červeného štvorca. Červený štvorec znázorňuje zvolenú veľkosť zorného poľa primárneho zväzku. Pre detailnejší pohľad na vzniknutú hranu, bola vzorka následne umiestnená do SEM mikroskopu LYRA³. Výsledné pohľady sú na obrázku 7.3.

7.2. SKÚMANIE HRANY KRÁTERA

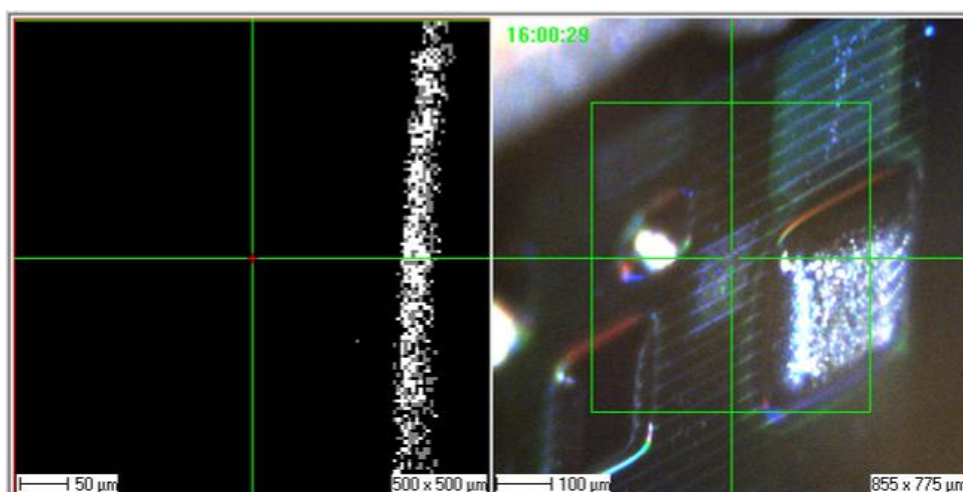
Vo vrchnej časti 7.3b je vidieť Trench hradlové štruktúry. V objeme je pozorovateľná drsnosť vytváraná odprašovaním materiálu.



Obr. 7.3: Kolmý pohľad na vzniknutý rez v SEM. Pohľad je prevrátený o 180° (a). Pohľad na pripravený rez pod uhlom 40° od kolmice k povrchu (b).

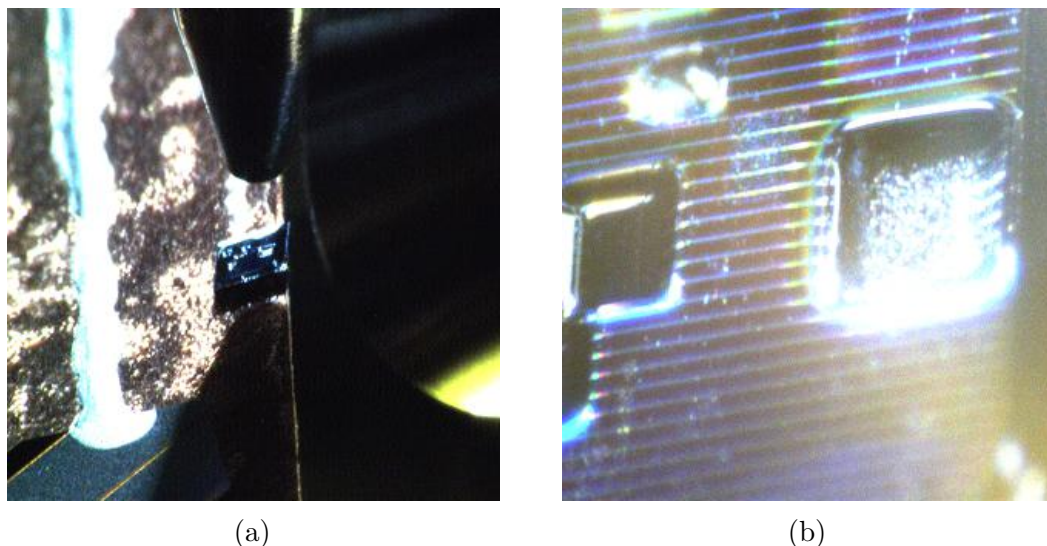
7.2. Skúmanie hrany krátera

Druhým experimentom overenia funkčnosti zostrojeného držiaka bolo skúmanie hrany krátera po predchádzajúcej klasickej hĺbkovej analýze. Ako vzorka bola použitá dióda. Pri tomto pokuse bola vzorka naklonená spoiatku o $(33 \pm 3)^\circ$. Následne bol zapnutý analyzátor a bola hľadaná optimálna poloha pre maximalizáciu zbieraného signálu. Pri tomto uhle bol získaný len slabý signál sekundárnych iónov z malej oblasti, na ktorú bol zaostrý analyzátor. Toto možno pozorovať na obrázku 7.4.



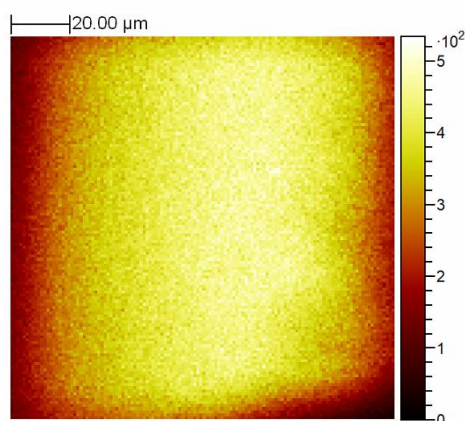
Obr. 7.4: Pohľad na naklonenú diódu spolu so signálom sekundárnych iónov.

Preto bola vzorka naklonená na menší uhol $(15 \pm 3)^\circ$ (obrázok 7.5). Týmto sa podarilo rozšíriť oblasť generovaného signálu na celú stenu krátera, čo umožnilo jej skúmanie.



Obr. 7.5: Náhľad do komory počas analýzy hrany krátera (a) a detail študovaného krátera (b).

Vplyv náklonu vzorky na získaný signál je reprezentovaný v profile kremíka, výsledky sú na obrázku 7.6. Vzorka bola pre lepšie uzemnenie nakontaktovaná striebornou pastou.



Obr. 7.6: Plošné zobrazenie signálu Si meraného na hrane krátera.

Podmienky merania boli: energia primárnych iónov Bi^+ ; $E_k = 30 \text{ keV}$, analyzovaná oblasť $(131.25 \times 131.25) \mu\text{m}$, zvolený raster $124 \times 124 \text{ px}$ a odprašovacie delo bolo vypnuté. Pre pomerne nízku intenzitu signálu bolo potrebné skôr akumulovať generovaný signál. Vykresnelý bol signál Si^+ , obrázok 7.6, tento signál má v skúmanej ploche relatívne rovnomernú intenzitu, najväčšie intenzitné rozdiely sú na ľavom a pravom okraji, toto sú oblasti povrchu a dna krátera v tomto poradí.

8. Záver

Cieľom tejto práce bolo použiť metódu SIMS pre analýzu štruktúr používaných v polovodičovom priemysle a navrhnuť držiak vzorky do používaného zariadenia ToF-SIMS⁵.

Bol navrhnutý držiak s náklonom vzorky, kompatibilný so systémom držiakov používaných v zariadení SIMS. Používa lineárny piezomotor od spoločnosti SmarAct [41]. Pre tento držiak bola vytvorená výkresová dokumentácia a následne boli jednotlivé diely vyrobené. Výsledný držiak bol testovaný pre kompatibilitu s UHV prostredím v zakladacej komore prístroja pred vložením do hlavnej komory. Následne bol držiak testovaný v hlavnej komore vytvorením rezu vzorky TIGBT tranzistora. Získaný rez bol kontrolovaný pomocou zariadenia FIB-SEM LYRA³. Ďalšie testovacie meranie malo za cieľ získať profil zo steny krátera vyrobeného predchádzajúcim meraním.

Pre dosiahnutie optimálnych výsledkov merania boli testované rôzne parametre merania na periodických vrstvách v kremíkovej matici. Merania boli robené na MoSi štruktúre Röntgenového zrkadla. Výsledkami boli zlepšenie tvaru stopy primárneho zväzku a použitie nižších energií pre analýzu vzoriek obsahujúcich periodické vrstvy.

Tieto poznatky boli využité pri meraní In kvantových jám v GaN substráte. Tieto merania študovali efekt ochladenia vzorky na nízku teplotu $T = -140^{\circ}\text{C}$. Profily merané pri zníženej teplote majú vyšší signál a lepšie hĺbkové rozlíšenie.

Pre vzorky TIGBT boli testované rôzne postupy rezania a prípravy výsledného povrchu pre analýzu v zariadení SIMS. Prvé merania boli robené na lámaných vzorkách, takýto povrch sa pri meraných kremíkových doskách neuplatnil pre ich malú hrúbku, kvôli ktorej dochádzalo k zakrivovaniu elektrického poľa v oblasti medzi vzorkou a extraktorom, čo spôsobovalo stratu signálu a jeho deformáciu.

Ďalším testovaným povrchom bola plocha vzniknutá rezom píly, táto podobne ako lámaná plocha nebola dostatočných rozmerov pre úspešnú analýzu. Následne bola vzorka zabrúsená pod uhlom 5° voči jej povrchu. Táto vzorka bola umiestnená na skonštruovaný držiak s náklonom a brúsená plocha bola pootočená a skúmaná. Tento postup dosiahol výrazne lepšie výsledky.

Poslednými experimentmi bolo zaliatie vzorky do vodivého termoplastu, vybrúsenie a vyleštenie hrany. Tento postup dosiahol najlepšie výsledky signálu, bez jeho deformácie. Bolo možné pozorovať trenchové štruktúry a v detaile bolo rozlíšenie prístroja až 258 nm.

Literatúra

- [1] G. E. Moore, “Cramming more components onto integrated circuits,” *Electronics*, vol. 38, no. 8, 1965.
- [2] M. M. Waldrop, “The chips are down for moore’s law,” *Nature News*, vol. 530, no. 7589, p. 144, 2016.
- [3] B. J. Baliga, *Power semiconductor devices*. PWS publishing company, 1996.
- [4] J. Karlovský, “Analýza bipolárních tranzistorů s izolovaným hradlem,” [bakalárka práce], Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [5] F. Auerbach, J. G. Bauer, M. Glantschnig, J. Gottert, M. Hierholzer, A. Porst, D. Reznik, H.-J. Schulze, T. Schutze, and R. Spanke, “6.5 kv IGBT-modules,” in *Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE*, vol. 3, pp. 1770–1774, IEEE, 1999.
- [6] Y. Gao, A. Q. Huang, S. Krishnaswami, J. Richmond, and A. K. Agarwal, “Comparison of static and switching characteristics of 1200 V 4H-SiC BJT and 1200 V Si-IGBT,” *IEEE transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 3, pp. 887–893, 2008.
- [7] B. J. Baliga, *Fundamentals of power semiconductor devices*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [8] M. Harada, T. Minato, H. Takahashi, H. Nishihara, K. Inoue, and I. Takata, “600 V trench IGBT in comparison with planar IGBT-an evaluation of the limit of IGBT performance,” in *Power Semiconductor Devices and ICs, 1994. ISPSD’94., Proceedings of the 6th International Symposium on*, pp. 411–416, IEEE, 1994.
- [9] A. Mihaila, V. Sundaramoorthy, R. Minamisawa, L. Knoll, H. Bartolf, E. Bianda, G. Alfieri, and M. Rahimo, “A novel edge termination for high voltage SiC devices,” in *Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2016 28th International Symposium on*, pp. 223–226, IEEE, 2016.
- [10] R. Pérez, D. Tournier, A. Pérez-Tomás, P. Godignon, N. Mestres, and J. Millán, “Planar edge termination design and technology considerations for 1.7-kV 4H-SiC PiN diodes,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 52, no. 10, pp. 2309–2316, 2005.
- [11] I. Bencuya, “High voltage transistor having edge termination utilizing trench technology,” jul -4”1995. US Patent 5,430,324.
- [12] J. Bauer, F. Auerbach, A. Porst, R. Roth, H. Ruething, and O. Schilling, “6.5 kV-modules using IGBTs with field stop technology,” in *Power Semiconductor Devices and ICs, 2001. ISPSD’01. Proceedings of the 13th International Symposium on*, pp. 121–124, IEEE, 2001.
- [13] S. Koveshnikov, W. Tsai, I. Ok, J. Lee, V. Torkanov, M. Yakimov, and S. Oktyabrsky, “Metal-oxide-semiconductor capacitors on GaAs with high-k gate oxide and amorphous silicon interface passivation layer,” *Applied physics letters*, vol. 88, no. 2, p. 022106, 2006.

LITERATÚRA

- [14] L. De Los Santos Valladares, *Study of thin metal films and oxide materials for nanoelectronics applications*. PhD thesis, University of Cambridge, 2012.
- [15] H. Lüth, *Solid surfaces, interfaces and thin films*, vol. 5. Springer, 2010.
- [16] J. Čechal, *Self-ordering and self-assembly at surfaces = Samouspořádané struktury na površích*. Brno: VUTIUM, 2014.
- [17] M. Komora, “Organické materiály pro molekulární kvantové bity,” [bakalárka práce], Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [18] D. M. Mattox, *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew, 2010.
- [19] D. M. Dobkin and M. K. Zuraw, *Principles of chemical vapor deposition*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [20] P. Van der Heide, *Secondary Ion Mass Spectrometry: An Introduction to Principles and Practices*. John Wiley & Sons, 2014.
- [21] J. Orloff, *Handbook of charged particle optics*. CRC press, 2008.
- [22] P. Glajc, *Testování a optimalizace iontového zdroje*. [diplomová práce], Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.
- [23] I. Brodie and J. J. Muray, *The physics of micro/nano-fabrication*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [24] G. F. Vander Voort, *Metallography, principles and practice*. ASM International, 1984.
- [25] M. S. Kulkarni, “A review and unifying analysis of defect decoration and surface polishing by chemical etching in silicon processing,” *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 42, no. 12, pp. 2558–2588, 2003.
- [26] L. Reimer, *Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis*, vol. 45. Springer, 2013.
- [27] T. Hrnčir, J. Dluhos, L. Hladik, and E. Moyal, “Advances in FIB-SEM analysis of TSV and solder bumps—approaching higher precision, throughput and comprehensiveness,” in *Conference Proceedings of the 40th International Symposium for Testing and Failure Analysis*, pp. 136–42, 2014.
- [28] M. Tarutani, Y. Takai, and R. Shimizu, “Application of the focused-ion-beam technique for preparing the cross-sectional sample of chemical vapor deposition diamond thin film for high-resolution transmission electron microscope observation,” *JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS PART 2 LETTERS*, vol. 31, pp. L1305–L1305, 1992.
- [29] M. Shibata, “Cross section specimen preparation device using argon ion beam for SEM,” *JEOL news*, vol. 39, no. 1, 2004.
- [30] Struers, “TEGRAMIN.” Dostupné z: <https://www.struers.com/Products/Grinding-and-Polishing/Grinding-and-polishing-equipment/Tegramin> 18.05.2018.

- [31] Struers, “SiC bruné papíry.” Dostupné z: https://e-shop.struers.com/CZ/CS/products/Grinding/SiC_Grinding_Papers?sortById=1&filter=300__mm__%2f__12%22 20.05.2018.
- [32] Struers, “Leštící Povrchy.” Dostupné z: https://e-shop.struers.com/CZ/CS/products/Polishing/Cloths_and_Films?sortById=1&filter=MD-Polishing_Cloths____300__mm__%2f__12%22 20.05.2018.
- [33] Struers, “Diamantové suspenze.” Dostupné z: https://e-shop.struers.com/CZ/CS/products/Polishing/Diamond_Suspensions?sortById=1 20.05.2018.
- [34] B. Ber, P. Bábor, P. Brunkov, P. Chapon, M. Drozdov, R. Duda, D. Kazantsev, V. Polkovnikov, P. Yunin, and A. Tolstogousov, “Sputter depth profiling of Mo/B4C/Si and Mo/Si multilayer nanostructures: A round-robin characterization by different techniques,” *Thin Solid Films*, vol. 540, pp. 96–105, 2013.
- [35] A. Hospodková, M. Nikl, O. Pacherová, J. Oswald, P. Brůža, D. Pánek, B. Foltynski, E. Hulicius, A. Beitlerová, and M. Heuken, “InGaN/GaN multiple quantum well for fast scintillation application: radioluminescence and photoluminescence study,” *Nanotechnology*, vol. 25, no. 45, p. 455501, 2014.
- [36] S. Holzer, S. Krivec, S. Kayser, J. Zakel, and H. Hutter, “Large O₂ Cluster Ions as Sputter Beam for ToF-SIMS Depth Profiling of Alkali Metals in Thin SiO₂ Films,” *Analytical chemistry*, vol. 89, no. 4, pp. 2377–2382, 2017.
- [37] S. Pavel and J. Brandejs, *Výběr z norem pro konstruční cvičení*, vol. 5. Brno: CERM, 2013.
- [38] CORING, “MACOR Machinable Glass Ceramic for Industrial Applications.” Dostupné z: <https://www.corning.com/media/worldwide/csm/documents/71759a443535431395eb34ebeat091cb.pdf> 09.05.2018.
- [39] Smiths, “PTFE Technical Datasheet.” Dostupné z: <https://www.smithmetal.com/pdf/plastics/ptfe.pdf> 09.05.2018.
- [40] Smiths, “PEEK Technical Datasheet.” Dostupné z: <https://www.smithmetal.com/pdf/plastics/peek.pdf> 09.05.2018.
- [41] SmarAct, “SLC-1730.” Dostupné z: <http://www.smaract.com/products/linear-positioners/slc-series/slc-1730> 16.10.2017.
- [42] SMB Bearing, “ZrO₂ Ceramic Bearings.” Dostupné z: <https://www.smbbearings.com/products/zro2-ceramic-bearings.html> 16.01.2018.

Zoznam skratiek

AFM	mikroskopia atomárnych síl – Atomic Force Microscopy
CVD	chemická depozícia z plynnej fáze – Chemical Vapour Deposition
DC	jednosmerný prúd – Direct Current
Duo	Duoplazmatronový zdroj – Duoplasmatron
EI	zdroj s ionizáciou dopadom elektrónov – Electron Ionization ion source
FI	iónový zdroj s ionizáciou poľom – FIeld Ionization ion source
FIB	fokusovaný iontový svazek – Focused Ion Beam
HRM	tvrdosť podľa Rockwellovej M stupnice
IGBT	bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom – Insulated Gate Bipolar Transistor
LMIG	iónový zdroj z tekutého kovu – Liquid Metal Ion Gun
LMIS	iónový zdroj z tekutého kovu – Liquid Metal Ion Source
ML	monovrstva – Monolayer
MOS	štruktúra kov oxid polovodič – Metal Oxid Semiconductor
MOSFET	unipolárny tranzistor – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
N	N dopovaná vrstva
N ⁺	silno dopovaná N vrstva
NPN	bipolárny tranzistor typu NPN
Of-Cu	bezokyslíkatá meď – Oxygen-free Copper
OPN	oblasť priestorového náboja – Depletion region
P	P dopovaná oblasť
P ⁺	silno P dopovaná vrstva
P-i-N	dióda s oblasťou priestorového náboja, OPN, ktorá tvorí intirnzický polovodič
P-N	P-N prechod
PVD	fyzikálna depozícia z plynnej fáze – Physical Vapour Deposition
PNP	bipolárny tranzistor typu PNP
RF	rádiofrekvnečný iónový zdroj – Radio-Frequency ion source
SEM	rastrovacia elektrónová mikroskopia – Scanning Electron Microscopy
SI	zdroj s povrchovou ionizáciou – Surface Ionization ion source

SIMS	hmotnostná spektroskopia sekundárnych iónov – Secondary Ion Mass Spectrometry
SPM	mikroskopia skenovacíou sondou – Scanning Probe Microscopy
TIGBT	bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom – Trench Insulated Gate Bipolar Transistor
TEM	transmisný elektrónový mikroskop – Transmission Electron Microscope
ToF	Filter podľa doby letu – Time of Flight
UHV	veľmi vysoké vákuum – Ultra High Vacuum
ÚFI	ústav fyzikálního inženýrství
VA	voltampérová charakteristika

Zoznam príloh

Číslo výkresu	Názov výkresu	Formát
UCS-01-01	TELO DRŽIAKA S NÁKLONOM	A2
UCS-01-02	DRŽIAK PIEZOMOTORU	A4
UCS-01-03	OSKA NÁKLONU VZORKY	A3
UCS-01-04	DRŽIAK VZORKY	A4
UCS-01-05	DRŽIAK LOŽISKA 1	A4
UCS-01-06	KLADKA 1	A4
UCS-01-07	PERO KLADKY 1	A4
UCS-01-08	OSKA OBRACANIA LANA	A4
UCS-01-09	KLADKA 2	A4
UCS-01-10	KLADKA 3	A4
UCS-01-11	DIŠTANČNÝ KRÚŽOK	A4
UCS-01-12	OSKA SMEROVANIA	A4
UCS-01-13	DRŽIAK OSKY SMEROVANIA L	A4
UCS-01-14	DRŽIAK OSKY SMEROVANIA R	A4
UCS-01-15	KLADKA 4	A4
UCS-01-16	KLADKA 5	A4
UCS-01-17	DRŽIAK LOŽISKA 2L	A4
UCS-01-18	DRŽIAK LOŽISKA 2R	A4
UCS-01-00	ZOSTAVA DRŽIAKA S NÁKLONOM VZORKY	A2